

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETOREOLOJİK AKIŞKANLARIN SENTEZİ VE REOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ESRANUR KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

TEMMUZ 2019

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETOREOLOJİK AKIŞKANLARIN SENTEZİ VE REOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ESRANUR KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEMMUZ 2019

Tezin Başlığı: Manyetoreolojik Akışkanların Sentezi ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi

Tezi Hazırlayan: Esranur KAYA

Sınav Tarihi: 09/07/2019

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşe SARIMEŞELİ PAÇACI

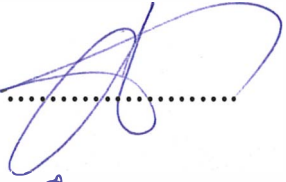
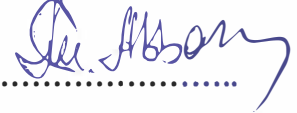
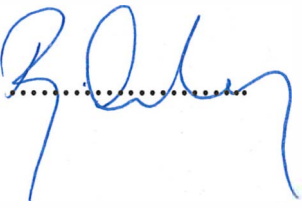
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV

İnönü Üniversitesi

Dr. Öğr.Üyesi Ramazan ORHAN

Fırat Üniversitesi


.....

.....

.....

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘‘Manyetoreolojik Akışkanların Sentezi ve Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi’’başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Esranur KAYA



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MANYETOREOLOJİK AKIŞKANLARIN SENTEZLENMESİ VE REOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Esranur Kaya

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

66 + ix sayfa

2019

Danışman: Prof. Dr. Ayşe SARİMEŞELİ PAÇACI

Manyetoreolojik akışkanlar (MR), uygun bir taşıyıcı sıvı içine dağılmış manyetik özellik taşıyan metal partiküller içeren, manyetik alan etkisinde akış özellikleri kontrol edilebilen akışkanlardır. Manyetik alan etkisi ile reolojik özelliklerinin çok hızlı ve tersinir değişmesinden kaynaklanan avantajlardan dolayı bu akışkanlar son yıllarda oldukça popüler hale gelmiştir. MR akışkanlarla ilgili çalışmaların artması sonucu içinde MR akışkanların yer aldığı farklı kullanım alanları ortaya çıkmıştır. MR akışkanların titreşim ve darbe gibi dış etkenlerden kaynaklanan hareketleri sönmüleme özelliklerinden dolayı bu akışkanlar otomobil sektörü, inşaat mühendisliği, uzay ve havacılık gibi birçok alanda kullanılır. Ayrıca bazı çalışmalarda MR akışkanların tıp ve biyomedikal alanlarında da kullanılabildiği görülmektedir.

Bu çalışmada, kayısı çekirdeği yağı ile hazırlanan çeşitli MR akışkanlar sentezlenerek reolojik davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, manyetik partikül boyutu, manyetik partikül konsantrasyonu ve manyetik alan şiddeti parametre olarak seçilerek sentezlenen akışkanların reolojik davranışları çeşitli manyetik alan değerleri altında incelenmiştir. Piyasadan temin edilen demir içeriği yüksek lazer yazıcı toner tozu ve laboratuarda sentezlenen Fe_3O_4 tanecikleri ile 2 farklı MR akışkan hazırlanmıştır. Her bir MR akışkan içine 3 farklı konsantrasyonda (% 20, %30 ve %40) manyetik partikül eklenerek elde edilen toplam 6 adet örneğin manyetik alanlı ve alansız ortamda reolojik davranışları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, manyetik partikül boyutunun, konsantrasyonunun ve uygulanan manyetik alan şiddetinin artmasının akışkanın viskozite ve eşik kayma gerilimi değerlerini artırdığını göstermiştir. Ayrıca, sentezlenen MR akışkanların çökme davranışları da incelenmiştir. Sonuç olarak manyetik partikül boyutu ve konsantrasyonu arttıkça akışkanın çökme oranının arttığı ve manyetik alan şiddeti, manyetik tanecik konsantrasyonu, manyetik tanecik boyutu arttıkça akışkanın eşik kayma gerilmesi değerinin de arttığı tespit edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Manyetoreolojik akışkan, reoloji manyetik alan

ABSTRACT

MASTER THESIS

SYNTHESIS OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS AND INVESTIGATION OF THEIR RHEOLOGICAL PROPERTIES

Esratur KAYA

Inonu University
Institute of Science and Technology
Department of Chemical Engineering

66 + ix page

2019

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe SARİMEŞELİ PAÇACI

Magnetorheological fluids (MR) are the fluids that can be controlled by magnetic field-effect flow properties containing magnetic particles with magnetic properties scattered in a suitable carrier fluid. These fluids have become very popular in recent years due to the advantages resulting from quick and reversible variation of their rheological properties with magnetic field. As a result of the increase in the studies on MR fluids, different usage areas have emerged in which MR fluids are involved. These fluids are used in many areas such as automobile industry, civil engineering, space and aerospace because of the damping properties of MR fluids due to external factors such as vibration and impact. In addition, some studies show that MR fluids can be used in medical and biomedical fields.

In this study, it is aimed to examine the rheological behavior of various MR fluids that are prepared with apricot kernel oil. For this reason, magnetic particle size, magnetic particle concentration and magnetic field strength were chosen as the working parameters and rheological behaviors of the synthesized fluids were examined under various magnetic field intensities. Two different MR fluids were prepared by using commercially available laser printer toner powder and Fe_3O_4 particles that were synthesized in the laboratory.

Rheological behaviors of 6 samples which were prepared by using particles having various concentrations (20 %, 30 % and 40 %) were examined under various magnetic field intensities. The results obtained showed that the increase in magnetic particle size, magnetic particle concentration and applied magnetic field strength increased the viscosity and shear stress values of the MR fluids. On the other hand, sedimentation of particles of MR fluids was also investigated. As a result, it was determined that as the magnetic particle size and concentration increased, the sedimentation ratio increased, and as the magnetic field intensity, particle size and concentration increased, the yield stress value of MR sample also increased.

KEYWORDS: Magnetorheological fluid, rheology, magnetic field

TEŞEKKÜRLER

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmalarım sırasında tecrübesi ve bilgi birikimi ile yardımlarını esirgemeyen, hiç bitmeyen çalışma azmi ve disipliniyle bana yol gösteren kıymetli hocam Prof. Dr. Ayşe SARİMEŞELİ PAÇACI' ya

Deney çalışmalarım sırasında ve çalışmalarımın her basamağında tüm içtenliği ile yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV' a

Deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını benden esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Adil KOÇ' a

Bu çalışmayı FYL–2018–1060 proje kodu ile maddi olarak destekleyen İnönü Üniversitesi BAP birimine,

Hayatım boyunca bana destek olan babama bana her zaman örnek olarak bugünlere gelmemi sağlayan anneme ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen canım kadar sevdiğim kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	ONUR SÖZÜ	
	ÖZET	i
	ABSTRACT	ii
	TEŞEKKÜRLER	iii
	İÇİNDEKİLER	iv
	SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
	ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
	ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1.	GİRİŞ	1
2.	KURAMSAL TEMELLER	2
2.1.	Literatür Çalışması.....	2
2.2.	Manyetizma, Manyetoreolojik Akışkanlar ve Reoloji.....	9
2.2.1.	Manyetik özellik gösteren maddeler.....	9
2.2.1.1.	Manyetik alan.....	10
2.2.1.2.	Elektromıknatıslar.....	11
2.2.2.	Manyetoreolojik akışkanlar.....	12
2.2.2.1.	Kayısı çekirdeği.....	15
2.2.2.2.	Gres yağı.....	18
2.2.2.2.1.	Greslerde kullanılan kalınlaştırıcılar.....	20
2.2.3.	Reoloji.....	22
2.2.3.1.	Akışkanların reolojik özellikleri.....	22
2.2.3.2.	Akışkanın yapısının reolojik özelliklere etkisi.....	23
2.2.3.3.	Kayma gerilimi altında akışkanların davranışı.....	24
2.2.3.3.1.	Zamandan bağımsız akış davranışları.....	27
2.2.3.3.1.1.	Sanki-plastik (Kayma incelmesi).....	28
2.2.3.3.1.2.	Dilatant akışkanlar (Kayma kalınlaşması).....	29
2.2.3.3.1.3.	Plastik akışkanlar.....	29
2.2.3.3.2.	Zamana bağımlı akış davranışları.....	30
2.2.3.3.2.1.	Tiksotropik akışkanlar.....	30
2.2.3.3.2.2.	Reopektik akışkanlar.....	30
2.2.3.4.	Akışkanların plastik davranışlarının modellenmesi.....	32
2.2.3.4.1.	Tek parametrelili modeller.....	32
2.2.3.4.2.	İki parametrelili modeller.....	32
2.2.3.4.2.1.	Bingham akışkanları.....	33
2.2.3.4.2.2.	Üstel kurala uyan akışkanlar.....	33
2.2.3.4.3.	Çok parametrelili reolojik modeller.....	34
2.2.3.4.3.1.	Herschel-Bulkley modeli.....	34
2.2.3.4.3.2.	Casson modeli.....	35
2.2.3.4.3.3.	Cross modeli.....	36
2.2.4.	Manyetoreolojik akışkanların kullanım alanları.....	38
3.	DENEYSEL ÇALIŞMA	42
3.1.	Materyal ve Metot.....	42
3.1.1.	Manyetik Malzeme.....	42
3.1.1.1.	Demir sentezi.....	42
3.1.2.	Taşıyıcı sıvı.....	46
3.1.3.	Katkı maddesi.....	46
3.2.	Manyetoreolojik Akışkanların Sentezlenmesi.....	47
3.3	Manyetoreolojik Akışkanların Reolojik Özelliklerinin Tayini.....	47

4.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	49
4.1.	Manyetoreolojik Akışkanların Reolojik Özellikleri.....	49
4.1.1.	Manyetik akışkan parametrelerinin reolojik özelliklere etkisi.....	49
4.2.	Manyetoreolojik Akışkanların Çökme Davranışları.....	56
4.3.	MR Akışkanlarda Manyetik Alan Şiddetinin Eşik Kayma Gerilmesi Değerine Etkisi.....	58
5.	SONUÇLAR	62
6.	KAYNAKLAR.....	63
	ÖZGEÇMİŞ.....	66



SİMGELER VE KISALTMALAR

$\dot{\gamma}$	Deformasyon (kayma) hızı (1/s)
γ	Deformasyon (kayma) oranı
τ_0	Eşik kayma gerilimi (Pa)
μ_g	Görünür viskozite (Pa.s)
H	Manyetik alan şiddeti (KA/m)
MR	Manyetoreolojik akışkan
MRE	Manyetoreolojik elastomer
τ	Kayma gerilimi (Pa)
G	Kayma modülü
ν	Kinematik viskozite
F	Kuvvet (N)
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
μ	Viskozite (Pa.s)
ρ	Yoğunluk
h_b	Berrak fazın yüksekliği
h	Akışkanın tamamının yüksekliği

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Mıknatıs kutupları ve aralarındaki itme – çekme kuvvetlerinin yönü.....	10
Şekil 2.2.	Mıknatıs etrafındaki manyetik alanın demir partikülleri yardımıyla gösterimi.....	11
Şekil 2.3.	Elektromıknatısın manyetik alanının sağ el kuralı ile gösterimi..	12
Şekil 2.4.	MR akışkandaki manyetik alana bağlı yapısal değişim (a) Manyetik alan yokluğunda (b) Manyetik alan uygulandığında (c) Manyetik alan sonunda oluşmuş zincir yapısı.....	13
Şekil 2.5.	MR akışkanın elektron mikroskobu ile çekilen fotoğrafı (Soldaki fotoğraf manyetik alan yokken, sağdaki fotoğraf manyetik alan uygulandığı andaki demir parçacıklarının durumunu gösterir).....	14
Şekil 2.6.	Kayısı çekirdeği yağı.....	16
Şekil 2.7.	Gres yağı.....	19
Şekil 2.8.	Durgun ortamda ve kayma gerilimi altında (a) polimerlerin (b) emülsiyonların ve (c) kil karışımlarının yönelimi.....	24
Şekil 2.9.	Newtonian akışkan modeli.....	26
Şekil 2.10.	Newton yasasına uymayan akışkanların reolojik davranış sınıflandırılması.....	27
Şekil 2.11.	Zamandan bağımsız akışkanlar.....	28
Şekil 2.12.	Plastik davranış modelleri I: eşik kayma değerini aştıktan sonra Newtonyen, II: eşik kayma değerini aştıktan sonra sanki plastik, III: eşik kayma değerini aştıktan sonra dilatant.....	29
Şekil 2.13.	Tiksotropik ve Reopektik davranışlarda kayma gerilmesi-zaman ilişkisi.....	30
Şekil 2.14.	Tiksotropik Akış Davranışı.....	30
Şekil 2.15.	Akışkanların kayma gerilimi (noktalı çizgiler) ve viskozitelerinin (siyah sürekli çizgiler) deformasyon hızıyla değişimlerine tipik örnekler: (a)Newton akışkanı, (b)Bingham plastiği, (c) Sahte plastik akışkan, (d) Tiksotropik akışkanlar, (e)Dilatant akışkanlar, (f) Reopektik akışkanlar, (g)Herschel-Bulkley modeline uyan akışkanlar,(h) Casson modeline uyan akışkanlar, (j) Cross modeline uyan akışkanlar.....	37
Şekil 2.16.	MR akışkan süspansiyonlarının otomobillerde kullanımı.....	38
Şekil 2.17.	MR damperlerin binalarda kullanımı ve Japonya Gelişen Bilimler Ulusal Müzesi uygulaması.....	39
Şekil 2.18.	Çin’de inşa edilen MR damperlerin kullanıldığı The Dong Ting Lake köprüsü	40
Şekil 2.19.	MR akışkan damperi kullanılan protez diz.....	40
Şekil 2.20.	MR akışkan damperi kullanılarak tasarlanmış çamaşır makinesi	41
Şekil 3.1.	Demir partiküllerinin sentezi.....	43
Şekil 3.2.	Farklı büyütme değerlerindeki lazer yazıcı toner tozunun SEM görüntüsü.....	44
Şekil 3.3.	Farklı büyütme değerlerindeki Fe ₃ O ₄ partiküllerinin SEM görüntüsü.....	46
Şekil 3.4.	MR akışkanın reolojik davranış tayini için hazırlanan düzenek...	48
Şekil 4.1.	% 20 oranında lazer yazıcı toner tozu içeren MR akışkanın reolojik davranışı.....	49

Şekil 4.2.	% 30 oranında lazer yazıcı toner tozu içeren MR akışkanının reolojik davranışı.....	50
Şekil 4.3.	% 40 oranında lazer yazıcı toner tozu içeren MR akışkanının reolojik davranışı.....	50
Şekil 4.4.	%20 oranında Fe ₃ O ₄ içeren MR akışkanının reolojik davranışı.....	51
Şekil 4.5.	%30 oranında Fe ₃ O ₄ içeren MR akışkanının reolojik davranışı.....	51
Şekil 4.6.	%40 oranında Fe ₃ O ₄ içeren MR akışkanının reolojik davranışı.....	52
Şekil 4.7.	Lazer yazıcı toner tozu içeren MR akışkanının çökme davranışı...	57
Şekil 4.8.	Fe ₃ O ₄ partikülleri içeren MR akışkanının çökme davranışı.....	57
Şekil 4.9.	Lazer yazıcı toner tozu için manyetik alanın eşik kayma gerilmesine etkisi.....	59
Şekil 4.10.	Fe ₃ O ₄ için manyetik alanın eşik kayma gerilmesine etkisi.....	59



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.	Faklı konsantrasyonlar için MR akışkan içeriğindeki madde miktarları.....	47
Çizelge 4.2.	Lazer yazıcı toner tozu ile hazırlanan MR akışkanların reolojik özellikleri.....	54
Çizelge 4.3.	Sentezlenen Fe ₃ O ₄ ile hazırlanan MR akışkanların reolojik özellikleri.....	55
Çizelge 4.4.	Farklı manyetik partikül boyutu ve farklı manyetik partikül konsantrasyonlarında hazırlanan MR akışkanların çökme oranları.....	58
Çizelge 4.5.	Manyetik partikül konsantrasyonundaki artışın manyetik alan şiddeti ile eşik kayma gerilmesi arasındaki ilişkiye etkisi.....	61



1.GİRİŞ

MR akışkanlar, ilk olarak 1940'ların sonuna doğru Uluslararası Standart ve Teknoloji Enstitüsü'nde çalışan Jacob Rabinow tarafından bulunmuştur. Rabinow MR akışkanları, manyetik alan etkisi altında reolojik özellikleri değiştiğinden "alan ile kontrol edilebilen akışkanlar" olarak adlandırmıştır. Manyetoreoloji, bir manyetik alan altındaki MR akışkanların reolojik özelliklerini inceleyen bilim dalıdır. MR akışkanlar, bir uygun taşıyıcı sıvı içerisine dağıtılmış mikron boyutunda manyetik özellik gösteren partiküller içeren ve uygulanan manyetik alan ile reolojik özellikleri kontrol edilebilen özel akışkanlardır. Bu akışkanlara uygulanan manyetik alanın etkisiyle akışkanın viskozitesinde çok kısa sürede büyük bir artış olur ve akışkan katı gibi davranmaya başlar. Manyetik alan etkisinin sonlandırılması ile bu işlemler ters yönde ve aynı hızda gerçekleşmektedir. Teknolojinin hızla gelişmesiyle MR akışkanların önemi ve kullanım alanının genişliği artmıştır. MR akışkanlar mekanik sistemleri çok kısa sürede kontrol altına alır. Ayrıca MR akışkanlar elektronik kontrol sistemleri ile mekanik sistemlerde, sessiz ve hızlı bir çalışma davranışı sergiler. MR akışkanların en önemli tercih nedenlerinin başında, sarsıntıları zaman kaybetmeden sönmüleme özelliği gelir. Bunun yanı sıra enerji tüketimlerinin düşük olması ve reolojik özelliklerinin uygulanan manyetik alan ile kontrol altına alınabilmesi MR akışkanların çeşitli alanlarda kullanılmasını sağlar. Yapılan çalışmalardan bilindiği kadarıyla MR akışkanlar otomobil sektöründe sarsıntıları sönmüleyen damperlerde, debriyaj, fren sistemlerinde ve yolcu güvenlik sistemlerinde kullanılır. İnşaat sektöründe deprem ve şiddetli rüzgarların oluşturacağı sarsıntıları sönmülemek için kullanılır. Bunun yanı sıra çamaşır makinelerinin sıkma modunda, uçak ve uzay araçlarını kalkış sırasında oluşacak sarsıntılardan koruması amacıyla kullanılır. Ayrıca robotlarda ve uzuv eksikliği olan insanların sağlıklı insanlar kadar rahat hareket etmesini sağlayacak protezlerde de kullanılır.

Bu çalışmada MR akışkanın laboratuarda sentezlenerek reolojik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda farklı özelliklere sahip MR akışkanlar sentezlenerek hazırlanan düzenekte manyetik alanlı ve manyetik alansız ortamlarda reolojik davranışları tayin edilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Literatür Çalışması

Boileau ve arkadaşları MR akışkan içeren yarı aktif bir amortisörün sıradan süspansiyonlu bir koltuktaki uç durdurma etkilerini ve sarsıntıyı azaltmadaki yararlarını araştırmışlardır. Kullanacakları MR damper, ticari olarak geliştirilen Motion Master yarı aktif sönümlenme sistemi olarak adlandırılan bir üründür. Böyle bir amortisör ile donatılmış bir koltuğun uç durdurma etkisini ve titreşim azaltma performansını değerlendirmişler ve sıradan bir amortisör içeren diğer koltuklarla karşılaştırmışlardır (Boileau vd., 2002).

Uzun yaptığı çalışmada çeşitli manyetoreolojik sıvılar hazırlayarak, hazırladığı MR sıvı ile piyasadan temin ettiği manyetoreolojik sıvının reolojik özelliklerini kıyaslamıştır. MR sıvıyı, 4 çeşit manyetik partikül, 3 çeşit yağ ve farklı manyetik partikül oranları kullanılarak toplamda 8 çeşit MR sıvı olacak şekilde sentezlemiştir. Sentezlenen akışkanların reolojik ve manyetoreolojik özellikleri hem manyetik alanlı hem de manyetik alansız ortamlar da gözlemlemiştir. Belirlenen özellikler piyasada satılan bir MR sıvı ile karşılaştırmıştır. Araştırmacı bu çalışmada tanecik çeşidini, karışımdaki tanecik oranını ve yağın viskozitesini parametre olarak belirleyerek bu parametrelerin akışkanların reolojik ve manyetoreolojik özelliklerine etkisini incelemiştir. Sentezlediği manyetoreolojik akışkanların damper performanslarını da farklı değerlerde gerilim ve manyetik şiddete maruz bırakarak incelemiştir. Laboratuvar deneylerini ve damper testlerini karşılaştırdığında aralarında paralellik gözlemlemiştir. Hem laboratuvar deneylerinde hem de damper testlerinde viskozitesi yüksek olan yağ ile tanecik oranı yüksek olan MR akışkanların viskozitelerinin de yüksek olduğunu gözlemlemiştir (Uzun, 2008).

Yabansu çalışmasında günümüzde oldukça aranan özelliklerden olan motorlu taşıtlarda konfor ve yol tutuşunu aynı anda arttırmak için MR damperli yarı aktif süspansiyonlar üzerinde kontrol uygulamaları yapmıştır (Yabansu, 2008).

Güler yapmış olduğu çalışmada manyetik özelliğe sahip partiküller ve bu partikülleri polimer ile kaplayarak MR akışkan hazırlamıştır. Çalışmasında akışkanın manyetik alanlı ve manyetik alansız ortamdaki reolojik davranışlarının yanı sıra manyetik partikülleri polimer ile kaplamanın çökme özelliklerine etkisini de

incelemiştir. Çalışmasında çökme davranışını engellemek için katkı malzemeleri kullanılarak farklı katkı malzemeleri ve katkı oranları ile manyetik partikül ve partikül oranlarına sahip 41 tane MR akışkan sentezlemiştir. Sentezlediği bu akışkanların reolojik davranışlarını manyetik alanlı ve manyetik alansız ortam için incelemiştir. Sonuçları piyasadan temin ettiği 2 çeşit MR akışkan ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmanın sonucunda manyetik tanecik ve katkı oranının artması ile akışkanın viskozitesinin artacağı, çökme özelliğinin, artan manyetik tanecik oranına kıyasla kullanılan katkı maddesi oranının artırılması ile geliştirilebileceği ve manyetik tanecik üzerine uygulanan polimer kaplama işleminin taneciklerin çökmelerini yavaşlattığı gözlemlenmiştir (Güler, 2010).

Akdoğan çalışmasında diz üstünden bacağını kaybetmiş insanların farklı yürüyüş hızlarında yürümesini sağlayan pnömatik (havalı) ve MR silindirli iki elektronik diz üstü protezi üretmiştir. Oluşturduğu protezlerin yürüyüş esnasındaki hareket başarısını denemek için sağlıklı bir insanın da protezleri kullanabileceği özel bir soket geliştirmiştir. Protezsiz ve bu soketi giyerek tasarlanan protezlerle belirli bir hızda yürüten sağlıklı kişinin yürüyüşlerinde görüntü tabanlı HİS (eylemsizlik duyargalarından oluşan çeşitli hareket inceleme sistemi) ile yapılan ölçüm sonuçlarında MR silindirli protez ile yapılan yürüyüş periyodunun doğal yürüyüş periyoduna daha yakın, pnömatik silindirli protez ile yapılan yürüyüşün ise en çok diz açısının doğal verilere uygun olduğu gözlemlenmiştir. Kullanıcının MR silindirli protezde yürüyüşün duruş evresinde, pnömatik silindirli protezde ise salınım evresinde daha rahat ve etkin olduğu görülmüştür (Akdoğan, 2011).

Özsoy yaptığı çalışmada, MR akışkanlar ve MR elastomerler arasındaki farkları ve benzerlikleri tespit etmiştir. MR akışkanın davranışını sürekli ortamlar mekaniği çerçevesinde sistematik bir şekilde incelemiştir. Elektromanyetik alanda yer alan sürekli ortam için gerekli denge denklemlerini yazmıştır. Ayrıca enerji denklemi ve entropi eşitsizliğini birleştirerek genelleştirilmiş enerji denklemi elde etmiştir (Özsoy, 2011).

Yıldırım yaptığı çalışmada manyetik alanın kontrolü ile manyetoreolojik ve ferro akışkanlara ait ısı transfer karakteristiklerinin belirlenmesini amaçlamıştır. İki paralel plaka arasına yerleştirdiği akışkanlara farklı manyetik alan şiddetini, sıcaklık gradyanına dik şekilde uygulayarak ısı iletkenliklerini incelemiştir. Bu çalışmasında,

MR akışkanı elde ederken kullanılacak olan manyetik partikülün karakterizasyonu, MR ve ferro-akışkanların sentezlenmesi, MR akışkanların karakterizasyonu (viskozitelerin ölçülmesi ve çökeltme miktarlarının ölçülmesi), deney düzeneğinin kurulması ve kalibrasyon çalışmaları ile MR akışkanlarının durgun haldeki ısı transferinin incelenmesi işlemlerini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonunda, hangi akışkanın iyi bir MR veya ferro akışkan özelliklerine sahip olduğuna ve hangi numuneden optimum ısı iletimi elde edildiğine bakmıştır (Yıldırım, 2011).

Atabay yaptığı çalışmada, pasif, aktif ve yarı aktif kontrol stratejileri tanımlamıştır. Manyetoreolojik (MR) sönümleyicileri anlatarak MR sönümleyicilerin çalışma prensipleri ve çeşitli MR sönümleyici modellerini tanıtmıştır. İniş takımı modeline, akıma bağlı Bouc–Wen modeli ile ifade edilen bir MR sönümleyici eklenmiş ve bir iniş senaryosu uygulamıştır. Detaylı bir şekilde yapılan bu çalışma, lineer analiz araçlarını, nonlineer analiz araçlarını, boşluk kavramını ve bir MR sönümleyicisi içerir. Bu çalışmada uygulanan MR sönümleyicisinin boşluklu ve boşluksuz iniş takımı modellerine eklenmesi bir yeniliktir. Ayrıca akıma bağlı Bouc–Wen modelinin uygulanması da diğer bir yeniliktir (Atabay, 2012).

Paksoy yaptığı çalışmada aracı, tam taşıt olarak modellemiş ve yarı aktif kontrol için MR (Manyetoreolojik) sönümleyici kullanmıştır. Kullandığı MR sönümleyiciyi modellemek için geliştirilmiş Bouc-Wen modelini tercih etmiştir. Sistemi önce pasif olarak modellemiş daha sonra pasif sönümleyiciler yerine MR sönümleyiciler kullanarak sistemi modellemiştir. MR sönümleyicinin kontrolsüz hali ile pasif sistemi karşılaştırmış ve emniyet açısından güvenli olduğunu belirlemiştir. Modelleme ve simülasyon çalışmalarını, MATLAB-Simulink programı yardımı ile gerçekleştirmiştir. Simülasyon çalışmaları ile oluşturulan sonuçlar, yarı aktif kontrolün taşıt titreşimlerinin azaltılmasındaki rolünü belirtmiştir. Ayrıca, bir karşılaştırma ve değerlendirme de kontrol yöntemleri arasında yapılmıştır (Paksoy, 2013).

Sadeghimorad çalışmasında, MR silindirli yarı etkin diz protezinin sonlu durum kontrolünü gerçekleştirmiştir. Bu doğrultuda protezli yürüyüş ile normal yürüyüşün morfolojik olarak benzerliklerini incelemiş ve normal yürüyüşten elde edilen veriler temel referans veri olarak kullanılarak hata değerlerini hesaplamıştır. Görüntü tabanlı

hareket inceleme sistemi tarafından hem protezli hem de normal yürüyüşlerin görüntüleri toplanmış ve yürüyüş özellikleri gözlemlenmiştir (Sadeghimorad, 2013).

Türkücü, yaptığı çalışmada taşıtlardaki motor titreşimlerini ve gürültüyü azaltmaya yönelik bir MR takoz tasarlayarak karakteristiğini belirlemiştir. Seri olarak imal edilen takozun alt ve üst elastomer parçaları kullanılarak MR takozlar tasarlamış ve imal etmiştir. Böylece bu projedeki üretim ve yatırım maliyetlerini azaltmıştır. İmal ettiği 3 farklı tip prototipin statik ve dinamik testlerini yaparak karakteristiklerini gözlemlenmiştir (Türkücü, 2013).

Yıldız çalışmasında, manyetoreolojik sönümleyicili taşıt süspansiyon sisteminin titreşimlerini azaltmak amacıyla bir kontrolör tasarlayarak uygulamasını yapmıştır. Tasarladığı kontrolörün etkinliğini laboratuvar ortamında hazırlanan boyutta çeyrek taşıt deney düzeneği üzerinde test etmiştir. Kontrolörü tümsek ve rastgele yol girişi olmak üzere iki farklı durumu göz önüne alarak değerlendirmiştir (Yıldız, 2013).

Khana ve arkadaşlarının, MR akışkanın uygulanan manyetik alan ile özelliklerinin çok hızlı değişebiliyor olması, MR akışkanların manyetik alan ile kolay kontrol edilebilmesi gibi özellikleri dikkatlerini çekmiştir. Yayınladıkları makalelerinde MR akışkanların kullanım şekilleri ve özelliklerini ele almışlardır. Ayrıca Bingham plastik modeline ve Herchel Bulkley modeline uyan MR akışkan kullanılan damperlerin matematiksel modellerini sunmuşlardır (Khana vd., 2014).

Doğdu yaptığı çalışmada manyetoreolojik akışkanların dinamik davranışını açıklayan bir model önermiş ve önerilen modelin doğrulanması için deneysel çalışma yapmıştır. Kütle oranları %15 manyetit, %15 ve %35 karbonil demir olan manyetik tozları silikon yağı ile karıştırarak 3 farklı manyetoreolojik akışkan sentezlemiştir. Sentezlediği akışkanların kayma hızına karşı, kayma gerilimi ve viskozite değerleri ile çökme kararlılıklarını gözlemlenmiştir. Akışkanların yoğunluklarını piknometre ile belirlemiştir. MR akışkanın yer değiştirme, hız, zaman ve kuvvet verileri, sinüzoidal uyartımda bulunularak farklı frekans ve akımlarda belirlemiştir. Modelden elde edilen kuvveti, deneysel kuvvete parçacık sürü optimizasyon tekniği ile yaklaştırmış ve model ile deney sonuçları arasındaki hatayı hesaplamıştır. Önerilen modeli, Genişletilmiş Bingham ve Viskoelastik-Plastik modelleri ile karşılaştırmış, önerilen modelin diğer modellere göre kuvvet yaklaşımının daha başarılı olduğunu gözlemlenmiştir (Doğdu, 2015).

Karabulut ve arkadaşları yaptıkları çalışmada MR akışkan ile çalışan dönel hareketler için yarı aktif bir sönümleyicinin geliştirilmesini amaçlamışlardır. Geliştirilen bu sönümleyici ile tek serbestlikli harekete iki yönde de birbirinden bağımsız şekilde viskoziteyi değiştirmek suretiyle değişken kuvvet uygulayarak kısıtlayabilen ve geri sürülebilir bir haptik kol sisteminde kullanılacaktır. Sonuçta, haptik kola bir kuvvet uygulandığında diğer yöndeki hareketi serbest kalmış olacaktır (Dede, 2015).

Mazlum ve Gümrük, dört farklı manyetik tozu silikon kauçuğuna ilave ederek elde ettikleri kompozit manyetoreolojik elastomer (MRE) malzemelerine bası yüklemesi yaparak bu durumdaki mekanik özelliklerini gözleme çalışması yapmıştır. Matris olarak Vario 40 silikon kauçuk malzemesini kullanmayı tercih etmişlerdir. MRE kompozitlerine ilave edilen partiküllerin hacimce oranını % 30 değerinde sabitlemişlerdir. Manyetik alan altında partiküllerin yönlenmesini gözlemek için üretim sırasında bazı numunelere dış manyetik alan uygulamışlardır. Manyetik alan uygulanan numuneleri anizotropik olarak adlandırmışlar, uygulanmayanları izotropik olarak adlandırmışlardır. Böylece anizotrop MRE numunelerin diğerlerine göre çok daha yüksek gerilme değerlerine sahip olduğunu görmüşlerdir. Bu çalışma ile manyetik partiküllerin cinsi ve manyetiklik özellikleri MRE malzemelerin mekanik ve MR özelliklerini etkilediği gözlemlenmiştir (Mazlum ve Gümrük, 2017).

Taşcıoğlu' nun 2017 yılında yayınlanan çalışmasında kampana tipi ve disk tipi manyetoreolojik frenlerin tork yoğunluğunu ve verimini karşılaştırmıştır. Parametrik olarak tasarladığı frenlerin manyetik analizini yapmış elde ettiği manyetik akı değerleri ile piyasadan temin ettiği ticari manyetoreolojik akışkanın akma gerilmesini bulmuştur. Karşılaştırma kriterleri maksimuma ulaştığında frenlerin kütlelerinin ve hacimlerinin benzer olduğu, fakat kampana tipi frenin performansının disk tipi frenin performansından yaklaşık iki kat daha büyük olduğu gözlemlenmiştir (Taşcıoğlu, 2017).

Akalın yaptığı çalışmada sönümlendirici olarak MR silindirin kullanıldığı ortezin elektromekanik tasarımını yaparak kestirim ve denetim yollarını geliştirmiştir. Ayrıca çalışmada manyetoreolojik (MR) silindire denetim sırasında istenilen akımı

sağlaması için bir akım kaynağı tasarlanmış, doğrulanmış ve endüstriyel bir ürün ile performansları karşılaştırılmıştır (Akalin, 2018).

Aydın ve arkadaşları yaptıkları çalışma ile manyetoreolojik sıvının kullanıldığı bir cihaz geliştirerek desteğe ihtiyacı olan, yetersiz ve zayıf kasları ihtiyacı doğrultusunda destekleyerek temel izometrik egzersiz hareketlerini gerçekleştirmelerini sağlamışlardır. Böylece manyetoreolojik sıvının hapsedildiği manyetik alan içerisinde, el ve üst ekstremitte vakalarında kasların güçlendirilmesini sağlayacak egzersiz hareketleri yapılabilir. Manyetik alan etkisindeki MR akışkan, katılarak veya serbest hale gelerek kas gücü ve fonksiyonel hareketin artmasını sağlamışlardır. Geliştirmiş oldukları cihaz içi MR akışkan ile dolu iken çevresindeki sargılara manyetik alan uygulanabilen bir kutudan ibarettir. Hastanın gelişim durumuna göre MR akışkanın sertlik derecesi manyetik alanın kontrol edilebilmesiyle sağlanır (Aydın vd.,2018).

Çetin yaptığı çalışmada, deprem etkisine maruz kalan yapıların MR sönümleyici yardımıyla titreşimini azaltmayı amaçlamıştır. Tasarladığı kontrolörlerin performanslarını laboratuvar ortamında altı katlı bir bina modeli üzerinde, titreşim tablası yardımıyla deneysel olarak test etmiştir. Sisteme MR sönümleyicinin bağlı olmadığı ‘Serbest’ durum, MR sönümleyicinin bağlı olduğu fakat gerilimin uygulanmadığı ‘Pasif (MR)’ durum ve kontrolörlerin uygulandığı haller için kontrolörlerin performansları ayrı ayrı belirlenmiştir. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlar, hem yerdeğiştirme-zaman ve ivme-zaman grafikleri, hem performans ölçütleri hem de her bir katın yer değiştirme ve ivmelerinin maksimum değerleri tasarlanan kontrolörlerin etkinliğini göstermiştir (Çetin, 2018).

Topçu çalışmasında küçültülmüş bir MR akışkanlı cihaz geliştirerek haptik cihazlarda ve ayarlanabilir fren veya sönümleyiciye ihtiyaç duyan sistemlerde kullanılmasını sağlamayı hedeflemiştir. Geliştirdiği cihazda sorunların en aza inmesi için peristaltik pompaların çalışma prensibini göz önüne almıştır. Geliştirdiği tasarım ve cihaz ile akışkan aktarımını kapalı çevrimde yapan bir sistem içerisindeki MR akışkanın viskozitesi kontrol edilebilecek ve bu cihazı kullanan haptik cihazlar veya sistemler sarsıntısız güç taşınması yapabilecektir (Topçu, 2018).

Ulasyar çalışmasında çamaşır makinesinin titreşiminin azaltılması için yeni bir manyetoreolojik sönümleyici tasarımı, analizi, aktif ve uyarlamalı kontrolüne yer vermiştir. Çamaşır makinesinin tüm frekans aralıkları için MR damper, değişken ve kontrollü sönümleme sağlar. Çamaşır makinesinde istenilen kuvvet değerine göre MR damperlerin sönümleme kuvveti seçilebilir. alışmasını üç farklı MR damper prototipinde gerçekleştirmiştir. Ayrıca çalışmasında çamaşır makinelerinde kullanılan MR damperler için literatürde ve henüz herhangi bir ticari çamaşır makinesinde kullanılmayan yeni bir adaptif denetleyici tasarımını tanıtılmıştır. Sonuç olarak uygulanan testlerde kullanılan MR damperlerin  prototipinde çamaşır makinesindeki titreşimi önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra MR damperlerin sıcaklığı tam döngü için damperlerin i ve dış yüzeylerinde llmştir (Ulasyar, 2018).

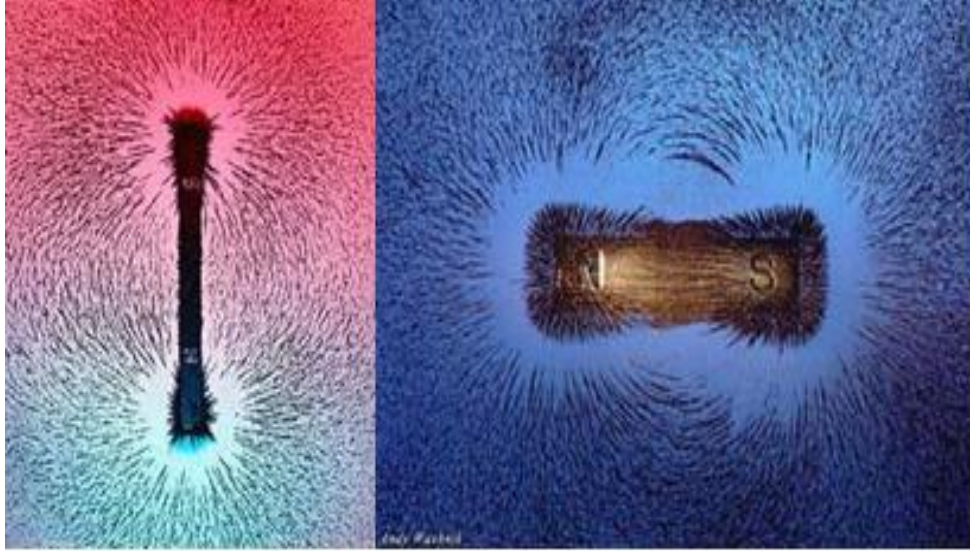
2.2. Manyetizma, Manyetoreolojik Akışkanlar ve Reoloji

Demir, nikel, kobalt gibi metalleri çekme özelliği gösteren maddelere mıknatıs denir. Mıknatıslar, MÖ 800' lü yıllarda Ege bölgesindeki Manisa şehri yakınlarındaki demir madenlerinde çalışan bazı insanların keşfi ile açığa çıkmıştır ve mıknatıslara magnesia adını vermişlerdir. Mıknatıslar doğal ve yapay mıknatıslar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal mıknatıslar demirin (Fe), oksijen (O₂) ile reaksiyonu sonucu oluşturduğu Fe₃O₄ bileşikleridir. Yapay mıknatıslar ise demir, nikel, kobalt, alüminyum ve berilyum gibi malzemelerin alaşımlarının mıknatıslandırılması ile oluşur. Mıknatısın etkisinin görüldüğü alana manyetik alan denir (Akar ve Yağımlı, 2000; MEB, 2011).

2.2.1. Manyetik özellik gösteren maddeler

Manyetik alandan etkilenen veya manyetik alanı etkileyen maddelere manyetik maddeler denir. Demir gibi manyetik özellik gösteren malzemeler kolay mıknatıslanabilir ancak mıknatıslanma etkisi uzaklaştırıldığında manyetik özelliklerini çabuk kaybederler. Nikel veya kobalt gibi sert malzemeler ise daha zor mıknatıslanmalarına karşın mıknatıslık özelliklerini yumuşak malzemelere göre daha uzun süre muhafaza ederler. Alüminyum, nikel ve kobalt malzemelerin alaşımından yapılan yapay mıknatıslar mıknatıslanma özelliklerini hiç kaybetmezler. Manyetik malzemeler manyetiklik özelliklerine göre üç sınıfa ayrılırlar (Akar ve Yağımlı, 2000).

- a) **Ferromanyetik Maddeler:** Manyetik geçirgenlikleri 1' den çok büyük olan maddelerdir. Bu maddelere manyetik alan etki ederse mıknatıslanırlar ve o bölgedeki manyetik alan şiddetini alırlar. Ferromanyetik maddelere, demir, nikel, kobalt gibi maddeler örnek olarak verilebilir.
- b) **Paramanyetik Maddeler:** Manyetik geçirgenlikleri 1' den az büyük olan maddelerdir. Bu maddeler manyetik alan etkisinde çok az mıknatıslandığından buldukları bölgenin manyetik alan şiddetini azda olsa azaltırlar. Paramanyetik maddelere, alüminyum ve manganez gibi maddeler örnek olarak verilebilir.



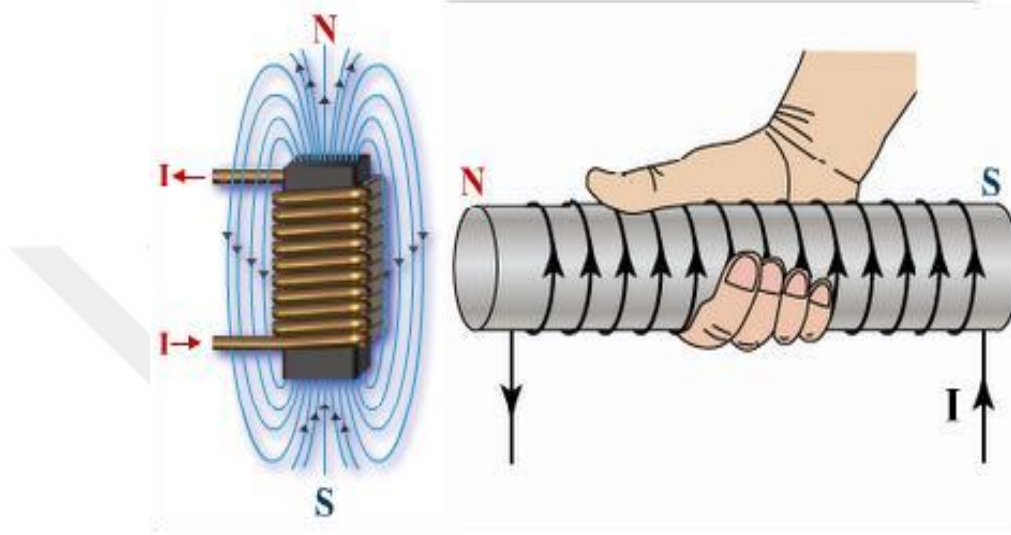
Şekil 2.2. Mıknatıs etrafındaki manyetik alanın demir partikülleri yardımıyla gösterimi

Demir partiküllerini bu şekilde yönlendirerek çizgiler halinde dizilmesini sağlayan ve belirli bölgelerde daha sık belirli bölgelerde daha seyrek olmasını sağlayan etki manyetik kuvvettir. Mıknatısın kutup bölgelerinde manyetik kuvvet çizgileri sık olduğundan mıknatısın çekme özelliği kutuplarda fazla, mıknatısın orta noktasında manyetik kuvvet çizgileri az olduğundan mıknatısın bu bölgedeki çekim kuvveti de azdır. Bu manyetik kuvvet çizgileri birbirlerini iterek birbirlerinden uzak durmaya çalışırlar dolayısıyla birbirlerini kesmezler. Manyetik kuvvet çizgileri her maddeyi etkilemese de her maddeden geçer. Ayrıca kuvvet çizgilerinin yönü mıknatısın dışında N kutbundan S kutbuna, mıknatısın içinde ise S kutbundan N kutbuna doğrudur (Akar ve Yağımlı, 2000; MEB, 2011).

2.2.1.2. Elektromıknatıslar

Bir iletkenen akım geçirildiğinde etrafında manyetik alan oluşur (MEB, 2011). İletkenlerin akımın etkisi ile oluşturdukları manyetik alanları çoğaltmak ve etkili bir şekilde yararlanmak için iletkenlerin sarılmalarıyla açığa çıkan bobinler kullanılır (Akar ve Yağımlı, 2000). Bu sayede bir bobin ile aynı yükü taşıyan ve aynı uzunlukta bulunan düz bir telden daha büyük bir manyetik alan oluşur. İçerisinde yumuşak demir (nüve) bulunan bobinden elektrik akımı geçirildiğinde demir mıknatıslık özelliği gösterir. Buna elektromıknatıs denir (Akar ve Yağımlı, 2000).

Oluşan manyetik alan miktarı telin boyu ile doğru orantılı olduğundan iletken tel üst üste sarılarak birim alandaki manyetik alan şiddeti artırılır. Bir elektromıknatısta manyetik alanın yönü sağ el kuralına göre bulunur (Akar ve Yağımlı, 2000; MEB, 2011). Şekil 2.3’ de sağ elin dört parmağı akımın yönünü gösterecek şekilde tutulduğunda başparmağın manyetik alanın yönünde (N kutbunu) olacağı gösterilmiştir (MEB, 2011).



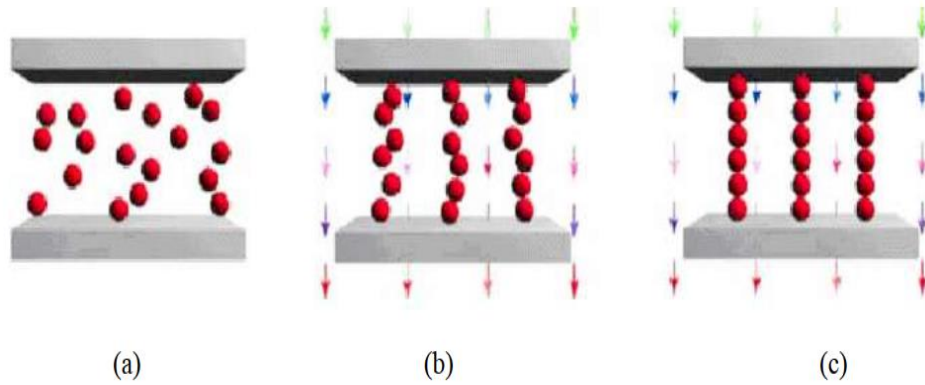
Şekil 2.3. Elektromıknatısın manyetik alanının sağ el kuralı ile gösterimi

2.2.2. Manyetoreolojik akışkanlar

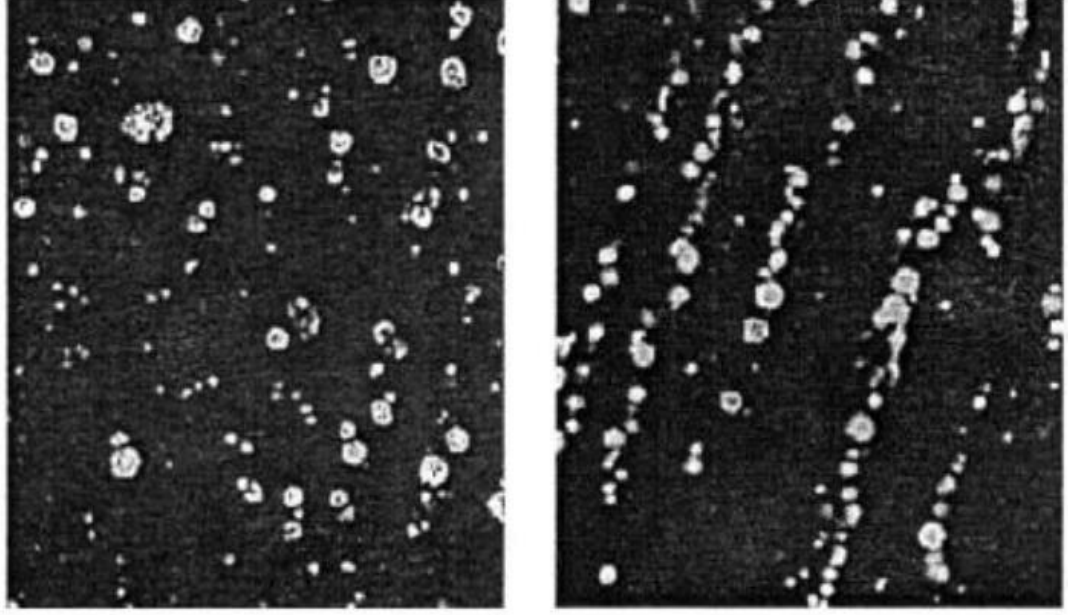
Manyetoreolojik (MR) akışkanlar uygun bir taşıyıcı sıvı ortamı içerisinde dağılmış manyetik özelliğe sahip mikron boyutunda metal tanecikler içeren özel akışkanlardır (Gadekar, 2017; Uzun, 2008). MR akışkanlara benzer davranış gösteren ferro akışkanlar da manyetik sıvılar olarak bilinmektedir. Ferro akışkanlar çok küçük (5-10 nm) partikül boyutuna sahip demir oksit, Mn ve Zn ferritler, Fe ve Co gibi manyetik taneciklerin süspansiyonlarıdır. Ferro akışkanların uygulanan manyetik alanın etkisi ile viskoziteleri yaklaşık iki kat artar, ancak belirli bir akma noktası değerine sahip değildir (Uzun, 2008). MR akışkan, hızlı cevap süresi, kolay homojen karışım oluşturma, zor çökelme, yüksek dinamik akma gerilmesi, düşük plastik viskozite, geniş sıcaklık bandında çalışabilme (-40 °C, 150 °C), imalat ve kullanımdan kaynaklanabilecek kirlenmelerden etkilenmeme gibi önemli özelliklere sahiptir (Paksoy, 2013).

MR akışkanların, enerji tüketimlerinin düşük olması, uzun ömürlü olmaları, sıvı kararlılığını sağlamak üzere çeşitli katkı maddelerinin güvenle kullanımına olanak sağlamaları gibi üstünlükleri vardır (Paksoy, 2013; Spaggiari, 2013). MR akışkanlar hazırlanırken, kullanılan manyetik partiküllerin tanecik boyutu, boyut dağılımı, tanecik şekli, manyetik doygunluk, koersivite ve taşıyıcı sıvı özellikleri göz önüne alınması gereken parametrelerdir (Uzun, 2008; Güler, 2010). MR akışkanların katılığı, uygulanan manyetik alana, partiküllerin boyut dağılımına (Partikülün küçük olması çökmeyi engellerken partikülün büyük olması akma gerilmesi değerini yükseltir) ve partiküllerin hacimsel oranına bağlıdır (Özsoy, 2011).

MR Akışkana manyetik alan uygulandığında, kutuplaşma oluşur ve MR akışkan içerisinde dağınık halde bulunan manyetik partiküller manyetik alanın uygulanması ile manyetik alan yönüne paralel olarak düzgün bir zincir şeklinde dizilirler (Doğdu, 2015). MR akışkan içerisinde yer alan manyetik partiküllerin manyetik alan etkisi ile yapısal değişimi Şekil 2.4' de gösterilmiştir (Doğdu, 2015; Spaggiari, 2013). Bu değişimin elektron mikroskobu ile çekilen görüntüsü ise Şekil 2.5' de verilmiştir (Paksoy, 2013).



Şekil 2.4. MR akışkandaki manyetik alana bağlı yapısal değişim (a) Manyetik alan yokluğunda (b) Manyetik alan uygulandığında (c) Manyetik alan sonunda oluşmuş zincir yapı



Şekil 2.5. MR akışkanın elektron mikroskobu ile çekilen fotoğrafı (Soldaki fotoğraf manyetik alan yokken, sağdaki fotoğraf manyetik alanın uygulandığı andaki demir parçacıklarının durumunu gösterir)

Bu manyetik partiküllerin zincir şeklinde dizilmesi akışkanın hareketini engellediğinden MR akışkanın akma gerilmesi değeri yükselir. Manyetik partiküller manyetik alan etkisinde belirli bir eşik kayma gerilmesine kadar zincir dizilimlerini muhafaza eder; ancak, eşik kayma gerilmesi değeri aşıldığında sahip oldukları zincir yapı bozulur ve madde akmaya başlar. Akışkanların akmaya başladığı manyetik alan ile kontrol edilebilen bu kayma gerilmesine “akma gerilmesi” denir ve bu değişim; hızlı ve tersinirdir (Güler, 2010). Akma gerilimine eşit veya akma geriliminden büyük bir dış kuvvet uygulandığında, MR akışkan akabilir (Uzun, 2008; Güler, 2010).

Akışkanın viskozitesi, manyetik alan ile milisaniyeler mertebesinde önemli oranda artar ve akışkan, bir katı gibi davranmaya başlar (Gadekar, 2017; Güler, 2010; Uzun, 2008). Manyetik alan uygulanması sonlandırıldığında ise akışkan aynı hızla eski haline dönmektedir. Uygulanan manyetik alanın şiddetinin artması ile akışkanın eski konumuna dönmesi için uygulanması gereken enerji artar. Ayrıca akışkan viskozitesi de uygulanan manyetik alanın şiddeti ile değişir.

MR akışkanların uygulanan manyetik alan ile reolojik özelliklerinin kontrol altına alınması bazı elektromekanik cihazlarda kullanılmasını sağlamıştır (Uzun, 2008; Güler, 2010). MR akışkanlar hazırlanırken, manyetik partikülün büyüklüğü, şekli, büyüklük ve şekil dağılımı, derişimi, yoğunluğu, taşıyıcı sıvının özellikleri, kullanılan katkı maddeleri, uygulanan manyetik alan, sıcaklık ve diğer faktörler akışkanın reolojik davranışını, kararlılığını ve çökme/tekrar karışma özelliğini etkileyen önemli parametrelerdir. MR akışkan, taşıyıcı sıvı, manyetik partikül ve katkı maddesi olmak üzere üç temel bileşenden oluşur (Doğdu, 2015; Gadekar, 2017)

a) Taşıyıcı Sıvı

Taşıyıcı sıvı, MR akışkan içinde yer alan manyetik partiküllerin ve kullanılan katkı maddelerinin homojen bir şekilde dağılmalarını sağlayan ve manyetikliği olmayan sıvılardır. Taşıyıcı sıvı, yüksek kaynama noktası ve düşük viskozite değerlerine sahip olmalıdır (Gadekar, 2017; Uzun, 2008). Ucuz ve kolay temin edilebilir olmalı ayrıca zehirleyici olmamalıdır. MR akışkan içerisinde yer alan manyetik partiküllerin homojen bir şekilde dağılmasını sağlayarak partiküllerin çökmesini engellemek taşıyıcı sıvının görevlerindedir. MR akışkanın kullanıldığı cihazlarda uygulama sıcaklığını belirleyen temel faktör, taşıyıcı sıvının viskozitesinin sıcaklığa bağlı olarak değişimidir (Uzun, 2008). Taşıyıcı sıvılar genellikle akışkanın reolojik özelliklerine ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak seçilir. Çoğunlukla petrol kaynaklı yağlar, silikonlar, mineral yağlar, polieterler, polisterler, bitkisel yağlar, sentetik hidrokarbon yağlar taşıyıcı sıvı olarak tercih edilir (Özsoy, 2011). Bu çalışmada taşıyıcı sıvı olarak bitkisel yağlar sınıfında yer alan kayısı çekirdeği yağı kullanıldığından aşağıda kayısı çekirdeği yağından bahsedilmiştir.

2.2.2.1. Kayısı çekirdeği yağı

Prunus armeniaca olarak bilinen kayısı, Rosaceae familyasından bir meyvedir. Kayısı, coğrafik olarak dünyanın hemen hemen her yerinde yetişebilme özelliğine sahip olsa da genellikle Akdeniz'e yakın ülkelerden olan Avrupa, Orta Asya, Amerika ve Afrika kıtalarına yayılarak burada yetişme imkanı bulmuştur. Kayısı, dünyada en çok ticareti yapılan meyvelerden biridir.

Kayısı çekirdeklerindeki yağ içeriği %40–50 civarındadır ve bu yağ kayısının çekirdeklerinden ekstraksiyon yoluyla elde edilir. Kayısı çekirdeği yağı içerik bakımından oldukça zengindir. Yapısında protein, şeker, lif, yağ asidi, karotenoid, fenolik, mineral, ve pektin bulunur. Yapısında bulunan bu maddeler sayesinde kayısı çekirdeği yağı, antimikrobiyal, antitumöjenik, kalp koruyucu, iltihap önleyici ve antioksidan özellik gösterir. Bu yağ, cilt bakımı için de uygun bir yağdır. Yüksek oranda A ve E vitamini içerdiğinden cildi mükemmel bir şekilde nemlendirir. Ayrıca saç bakımında kullanıldığında saçta yumuşaklık ve parlaklık kazandırır. Aromaterapi de kullanılan bazı karışımlarının temel maddesidir. Şekil 2.6’de kayısı çekirdeği yağı örneği verilmiştir (Demir, 2011).



Şekil 2.6. Kayısı çekirdeği yağı

b) Manyetik Partiküller

MR akışkan sentezinde kullanılacak olan partiküllerin seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli husus, partiküllerin manyetik özellik gösterebiliyor olmasıdır (Gadekar, 2017; Uzun, 2008). Manyetik özellik gösterebilen manyetik partiküllere demir, nikel, kobalt gibi elementler örnek olarak verilebilir. Bunlardan demir en önemlilerindedir (Uzun, 2008). Bunun nedenlerinden biri demirin manyetik doygunluğunun yüksek olmasıdır (Gadekar, 2017; Uzun, 2008).

Manyetik doyunluk maddeye uygulanan bir manyetik alandan elde edilecek maksimum manyetik alan olup, bu özellik maddenin doğasında vardır (Uzun, 2008). Demirin tercih edilme nedenlerinden diğeri ise demir taneciklerinin koersivitesinin düşük olmasıdır. (Koersivite maddeye etki eden manyetik alanın geri döndürülebilirliğine maddenin gösterdiği dirençtir). MR akışkana uygulanan manyetik alan etkisi sonlandırıldığında akışkanın milisaniyeler içerisinde eski durumuna dönmesi istendiğinden koersivite özelliği düşük, manyetik partiküller tercih edilir. Koersivite, küçük partiküllerde, partikül boyutuyla ilgilidir. Partikül boyutu küçüldükçe koersivite artar, partikül boyutu büyüdükçe koersivite azalır (Uzun, 2008).

MR akışkanın içerisindeki manyetik partiküllerin hacimce oranı, hem manyetik alanlı hem de manyetik alansız ortamda akışkanın reolojik özelliklerini önemli oranda etkilemektedir. MR akışkan içerisindeki manyetik partikül miktarı artarsa, MR akışkanın maksimum akma noktası değeri yükselir. Manyetik alansız durumda MR akışkanın viskozitesi artar (Uzun, 2008).

Partikül boyutu da manyetik alanlı veya manyetik alansız ortamda akışkanın viskozitesini etkilemektedir. Aynı oranda manyetik partikül içeren iki akışkandan, partikül boyutu büyük olan tanecik ile hazırlanan MR akışkanın akma noktası, partikül boyutu küçük olan manyetik partikülle hazırlanan MR akışkanın akma noktası değerinden daha büyüktür. Partikül boyutu büyüdükçe çökme hızı artar. Buda MR akışkanın kararlılığını azaltır. Partikül büyüklüğü 1 μm ' den küçük olursa Brownian hareketinden (akışkan içerisindeki partiküllerin serbest hareketini ve aynı zamanda bu hareketi açıklayan matematik modelidir) dolayı partiküller sıcaklığa daha duyarlı hale gelir (Uzun, 2008).

c) Katkı Maddeleri

MR akışkanlar hazırlanırken, genellikle kullanılan manyetik partiküllerin çökmesini ve kümeler haline gelmesini önleyecek, yağlama özelliği bulunan katkı maddeleri eklenir (Gadekar, 2017; Özsoy, 2011). Bunun nedeni, manyetik partikül ve taşıyıcı sıvı arasındaki yoğunluk farkının fazla olmasıdır (Uzun, 2008).

MR akışkanlar, yoğunluğu düşük taşıyıcı sıvı içerisine yoğunluğu yüksek manyetik partiküllerin dağıtılmasıyla oluştukları için depolama veya hareketsizlik sırasında, çökme görülebilir ve bu istenmeyen bir durumdur (Güler, 2010). Akışkanın olabildiğince kararlılığını koruması istendiğinden çökme işleminin üzerinden zaman geçtiyse kekleşme görülebilir. Çöken partiküller arasındaki boşluk azalır ve akışkan üzerinde çok küçük bir manyetikleşme etkisi bile kaldıysa aglomerasyon görülebilir.

MR akışkanların cihazlarda kullanımında akışkanın yüzeye temas etmesi sonucu aşınma oluşmaması veya manyetik partiküllerinin oksitlenmesi ile yüzeyde korozyon oluşmaması için taşıyıcı sıvıya katkı maddesi eklenerek adeta bir ağ yapı oluşturulur. Eklenen katkı maddeleri taşıyıcı sıvı ile manyetik partiküller arasındaki yoğunluk farkını da azaltmış olur (Gadekar, 2017; Uzun, 2008).

Literatürde oleik asit, gliserin, silika dumanı gibi maddeler katkı maddesi olarak seçilirken bu çalışmada son yıllarda geniş çalışma imkanları sağlamasından dolayı gres yağı tercih edilmiş ve aşağıda gres yağı ve özelliklerden bahsedilmiştir.

2.2.2.2. Gres yağı

Gres yağları madeni sabunlarla katılaştırılmış yağlar olup dış görünümü homojen bir madde gibidir. Temelde bir baz yağ ile sabun olarak adlandırılan bir kalınlaştırıcının birleşmesiyle oluşur (Franco, 2007; Franco, 2009). Ancak yapısal özelliklerinin iyileşmesini ve yeni özellikler kazanmasını sağlayan bir takım katkı maddeleri de eklenir. Gres yağları madeni yağlarda oluşu gibi baz yağlarla katkı maddelerinin (katıkların) karıştırılması işlemiyle değil, baz yağlarla kimyasal reaksiyona giren kalınlaştırıcıların tepkimesiyle oluşur. Kıvamları katıdan yarı akışkana kadar değişen yağlayıcılardır (Franco, 2007). Şekil 2.7' de gres yağı örneği verilmiştir.



Şekil 2.7. Gres yağı

Baz Yağ: Gresin yağının temelini oluşturan en büyük bileşenidir. Mineral yağ, sentetik yağ veya yağlama özelliği olan herhangi bir sıvı baz yağ olarak kullanılabilir (Franco, 2007).

Kalınlaştırıcı: Baz yağla birleştiğinde baz yağı, katı ile yarı sıvı arası bir yapıya dönüştürecek olan her türlü malzemedir. Gresler oluşturulurken en çok ayrı ayrı veya birlikte lityum, alüminyum, kalsiyum sabunları; kil, poliüre gibi kalınlaştırıcılar kullanılır. Günümüzde en yaygın şekilde kullanılan kalınlaştırıcı Lityum sabunlarıdır (Franco, 2007; Franco, 2009).

Katkı maddeleri: Katkı maddeleri ve dönüştürücüler, gresin mevcut özelliklerini değiştirerek bazı yeni özellikler sağlar. Gres yağlarında oksidasyon ve pas inhibitörleri, polimerler, aşırı basınç (EP) katkı maddeleri, aşınmayı önleyici katkı maddeleri, sürtünmeyi önleyici maddeler yaygın olarak kullanılır (Franco, 2007; Franco, 2009).

Genellikle mekanik aksamlarda kullanılan gres yağı yüksek sıcaklıklarda ya da ağır yüklerin kullanıldığı alanlarda tercih edilir. Gres yağları araç motorlarında, yük araçlarında, motosikletlerde ve traktörlerde yaygın olarak kullanılır. Araçlarda kullanılan gres yağı, mekanik aksamın temizlenmesinde, servis bakım zamanının uzamasında, parçaların daha sağlıklı ve uzun süre çalışmasında destek verir. Bunların dışında kullanılan yağ miktarlarının azalmasını sağlar (Morishita, 2013).

Hareket halindeki yüzeylerde gres yağının kullanılması yüzeyler arasındaki sürtünmeyi, aşınmayı ve titreşimi önleyerek sistemi pasa ve korozyona karşı korur (Morishita, 2013).

Günümüzde bazı uygulamalarda madeni yağlar yerine greslerin seçilme nedenleri;

- 1) Yağlayıcının tıkaç görevi görerek sisteme yabancı maddelerin girmesini engellemesi
- 2) Yeniden yağlama imkanı kısıtlı veya hiç yoksa
- 3) Yağlayıcının sistemdeki yerini mevcut özellikleri ile muhafaza etmesi gerekiyorsa; yani yağlayıcının akıntı ve sızıntıya karşı dayanıklı olması gerekiyorsa gres yağı tercih edilir (Anonymous.5 Feb, 2019).

2.2.2.2.1. Greslerde kullanılan kalınlaştırıcılar

Kalınlaştırıcılar, gres üretiminde sıklıkla kullanılan madeni sabunlar olup yağ grese dönüştürmekle kalmayıp gresin pek çok özelliklerini kontrol eden maddelerdir. Bunlar hayvansal veya bitkisel bir yağ asidinin metal hidroksitlerle reaksiyona girmesiyle elde edilir (Franco, 2007; Franco, 2009). Başlıca kalınlaştırıcı olarak kullanılan sabun cinslerine göre greslerin kritik özellikleri aşağıdaki gibidir (Anonymous.5 Feb, 2019).

- a) **Sodyum Sabunlu Gresler:** Mineral yağ içerisinde yağ asitlerinin veya esterlerin sodyum hidroksitle reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Suya karşı dayanıksız olup ısıya karşı dayanıklıdır. Kullanıldığı aksamı pas, korozyon gibi istenmeyen durumlardan korur. Maksimum 110-120 °C çalışma sıcaklıklarına kadar dayanıklıdır.
- b) **Kalsiyum Sabunlu Gresler:** Mineral yağ içerisinde yağ asitlerinin veya esterlerin kalsiyum hidroksitle reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Suya karşı dayanıklı olup ısıya ve pasa karşı dayanıksızdır. Faz değişikliğine düşük sıcaklıklarda izin vermezler. Pompalanabilme özellikleri bozulmaz. Maksimum çalışma sıcaklıklarının 90 °C civarında olması en büyük dezavantajlarıdır.

c) **Lityum Sabunlu Gresler:** Mineral yağ asitlerinin veya esterlerin lityum hidroksitle reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Suya ve sıcaklığa karşı dayanıklı olup sızdırmazlık özellikleri mükemmeldir. Pas ve korozyon oluşumunu engeller. Çok amaçlı olarak kullanılabilirdiği için en yaygın kullanılan gres çeşididir.

d) **Kompleks Sabunlu Gresler:** Modern üretim aksamalarında daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmek üzere geliştirilmiştir. Kalınlaştırıcıların yapısı asit yağları türevleri ve kalsiyum hidroksitle reaksiyonları sonucu oluşur. Suya ve sıcaklığa dayanıklı greslerdir.

d.1) **Kalsiyum Kompleks Sabunlu Gresler:** Mineral yağ ortamında 12 HSA ile düşük molekül ağırlıklı organik asit karışımının yüksek oranlarda kalsiyum hidroksitle reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Basınç ve yük taşıma özellikleri iyidir.

d.2) **Lityum Kompleks Sabunlu Gresler:** Mineral yağ ortamında 12 HSA ile düşük molekül ağırlıklı organik asit karışımının yüksek oranlarda lityum hidroksitle reaksiyona girmesi sonucu oluşur.

d.3) **Alüminyum Kompleks Sabunlu Gresler:** Mineral yağ ortamında don yağı asidi, benzoik asit ve suyun alüminyum izopropoksitle reaksiyona girmesiyle oluşur. Suya ve sıcaklığa karşı dayanıklı olup pasa ve oksidasyona karşı dirençleri zayıftır. Suya dayanıklı oldukları için dönel yatakların yağlanmasında kalsiyum sabunlu greslere alternatif oluşturur.

e) **Sabunsuz Gresler:** Bu tip gresler hazırlanırken kalınlaştırıcı olarak inorganik veya organik kimyasallar kullanılır. Kalınlaştırıcının sahip olduğu özelliklere göre yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Suya dayanıklı olup pompalanabilirliklerinin zayıf olması nedeniyle merkezi sistemlerde kullanımı sınırlıdır.

Gres seçimi yapılırken çalışma koşullarına uygunluğu ve maliyetlerin düşürülmesine olan katkısı önemlidir. Bu çalışmada da lityum sabunlu gres yağı kullanılmıştır.

MR akışkanlar ile ilgili araştırmalar arttıkça bu akışkanlar ile çalışan cihaz çeşidi de artmıştır. Farklı çeşit cihazlarda farklı reolojik özelliklere sahip akışkanlar kullanılabilir. Bu nedenle manyetoreolojik akışkanların reolojik davranışlarının bilinmesi önemlidir (Güler, 2010).

2.2.3. Reoloji

Reoloji kavramı ilk olarak 60 yıl kadar önce Easton Lafayette Koleji'nde Profesör Bingham tarafından açığa çıkarılmıştır. Reoloji, Yunanca “*rheo*” (akış) ve “*logy*” (bilim) köklerinden türeyen “akış bilimi” anlamında kullanılan bir terimdir (Uzun, 2008). Cisimler ister katı ister sıvı olsun üzerlerine uygulanan gerilme ile şekil değiştirirler. Reoloji bilimi katıların deformasyon, sıvıların akış özelliklerini inceler. Cisimler bir dış gerilme uygulanmadan da kendi ağırlıkları ile deformasyona uğrayabilir. Katı cisimlerin kendi ağırlıklarından dolayı oluşacak deformasyon miktarı oldukça küçük olduğundan ihmal edilir. Bu deformasyona 10-15 asırlık kiliselerin camları kanıt olarak gösterilebilir. Bu camların kalınlıkları ölçüldüğünde alt ve üst kısımlarının kalınlıklarının farklı olduğu alt kısmın kalınlığının üst kısma göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Uygulanan gerilim sonucu cisimde oluşan deformasyonun boyutu, gerilmenin şiddetine gerilmenin uygulandığı hız ve doğrultuya, cismin yapıldığı malzemenin viskozitesine göre değişiklik gösterir (Anonymous.12 Oct, 2019). Reolojik davranışın iki uç örneği olan Newtonian ve Hooken malzemeleri mekanik bilimin iki ana dalı olan Akışkanlar Mekaniği ve Katılar Mekaniğini oluştururlar (Yılmaz, 2017).

2.2.3.1. Akışkanların reolojik özellikleri

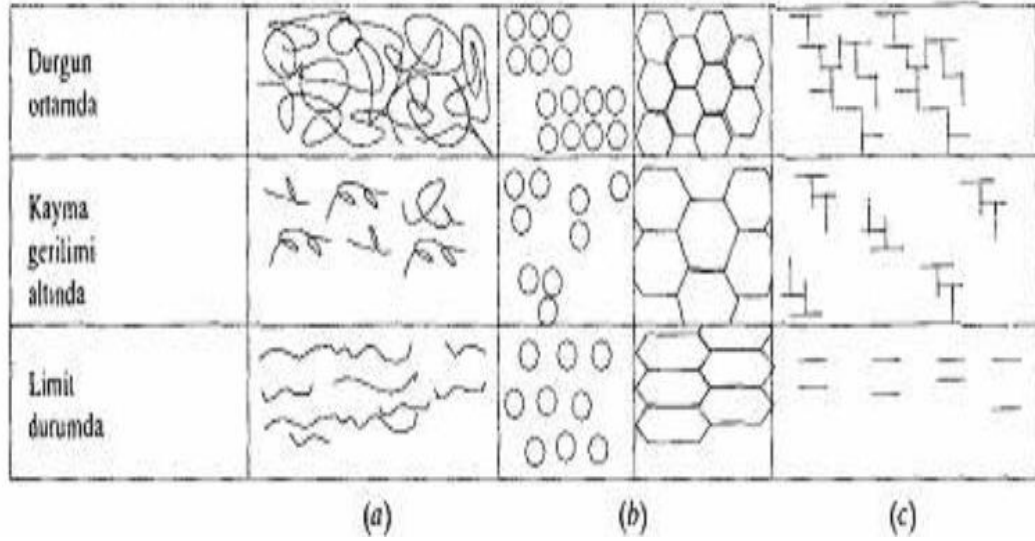
Akışkana bir dış kuvvetin etki etmesi sonucu sergileyeceği davranış moleküler yapısına bağlıdır. Molekül yapısı basit, küçük moleküllerden oluşan akışkanların maruz kaldığı deformasyon γ ($=dx/dy$), kayma gerilimiyle doğru orantılıdır. Kuvvet sürekli uygulandığında oluşan kayma hızı $\dot{\gamma}$ ($= dV/dy$) da kayma gerilimiyle doğru orantılıdır (Helvacı ve Peker, 2013).

$$\tau = \mu\dot{\gamma} = \mu (dV/dy) \quad (2.1)$$

Uygulanan kayma gerilimi ile içinde oluşan kayma hızı arasında doğrusal bir oran bulunan akışkanlar Newtonian akışkanlar olarak adlandırılır. Newtonian akışkanlara su, hava, benzin, alkol, gliserin gibi birçok basit akışkan örnek olarak verilebilir. Akışkanlar her zaman basit yapılu moleküllerden oluşmazlar. Karmaşık yapılu akışkanlara polimer çözeltileri, polimer eriyikleri örnek olarak verilebilir. Moleküler yapısı karmaşık olan çözelti ve eriyiklerle, katı veya sıvı olarak birden fazla fazdan oluşan çok fazlı akışkanları reoloji bilimi inceler. Newton kuralına uymayan akışkanların kayma gerilimine karşı davranışının incelenmesini, ölçülmesini ve modellenmesini kapsayan bilim dalına reoloji denir (Helvacı ve Peker, 2013).

2.2.3.2. Akışkanın yapısının reolojik özellikleri üzerine etkisi

Akışkan içerisinde yer alan molekül, damla, tane gibi birimler arasındaki etkileşim kuvvetleri büyük olduğunda akımın gerçekleşebilmesi için akışkanın önemli oranda deformasyona uğratarak bu birimler arasındaki ikincil bağların koparılması ve birimlerin serbest hale geçmesi sağlanır. Bu deformasyonu oluşturarak akımın gerçekleşebilmesini sağlayan gerilime eşik kayma gerilimi denir. Reoloji terimi içinde yer alan “deformasyon” kelimesi malzemeye, uzatma, sıkıştırma, kayma gibi kuvvetlerin etki etmesi sonucu, malzemenin şeklinde meydana gelen değişiklik anlamına gelir. Akışkana eşik kayma değerinin üzerinde bir kayma gerilimi uygulanırsa akışkan plastik, eşik kayma değerinin altında bir gerilim uygulanırsa akışkan elastik davranış gösterir. Kuvvet uygulandıkça akışkan deforme olur; basınç veya kayma gerilimi altında kuvvetin etki yönüne göre yönelimi değişen kimyasal bağlardaki gerilme ‘bağ’ enerjisi olarak depolanır. Uygulanan kuvvet durduğu anda kimyasal bağlar tekrar minimum enerji konumuna döner ve akışkan eski şeklini alır. Polimerler gibi uzun moleküllerin, kil-su gibi katı-sıvı karışımlarının ve yağ-su emülsiyonları sıvı-sıvı karışımlarının kayma gerilimi altında uğradıkları değişim Şekil 2.8’ de şematik olarak gösterilmiştir (Helvacı ve Peker, 2013).



Şekil 2.8. Durgun ortamda ve kayma gerilimi altında (a) polimerlerin (b) emülsiyonların ve (c) kil karışımlarının yönelimi

2.2.3.3. Kayma gerilimi altında akışkanların davranışı

Akışkanların reolojik davranışlarından bahsetmeden önce bazı temel kavramları tanımlamamız gerekir. Akım kavramı akışkanın sürekli ve kalıcı deformasyonu şeklinde tanımlanabilir. Elastik maddeler kuvvet uygulandığında şekil değiştiren (deforme olan) fakat hiçbir zaman akmayan maddelerdir. Akım başladıktan sonra kuvvet ortadan kaldırılırsa bile akışkan eski haline dönemez. Bir dış etki altında şekil değiştirmeye deformasyon denir. Uygulanan kuvvetin etkidiği doğrultuda meydana gelen ΔL uzamasının ilk uzunluk L ' ye oranına deformasyon oranı denir. $\gamma = \frac{\Delta L}{L}$ deformasyon oranı boyutsuzdur (Helvacı ve Peker, 2013).

Akışkan kümesi elastikse kuvvet etkimeye devam ettikçe belirli bir miktar daha uzar ve kopar. Plastik akışkanlar kuvvet etkisinde sürekli olarak uzamaya devam ederler; sınırın zamanla aldığı yol, hız cinsinden tanımlanabilir. Kuvvet etkisindeki sürekli deformasyonun $(\Delta L / t)$ ilk uzunluk L ' ye oranına deformasyon hızı ($\dot{\gamma}$) denir. Deformasyon hızı s^{-1} birimindedir. Akışkan akıyorsa, hız gradyanı deformasyon hızı ile eş değerdir (Helvacı ve Peker, 2013).

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta L / \Delta t}{L} = \frac{\Delta V}{L} = \frac{\Delta V}{\Delta X} \quad (2.2)$$

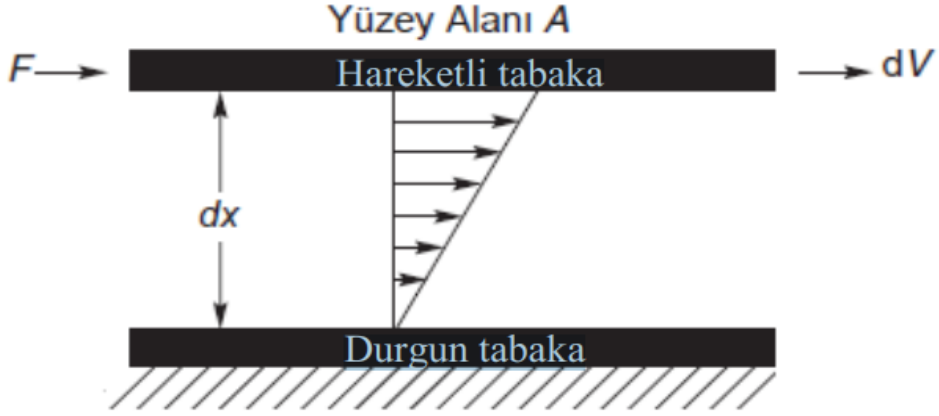
Akımın başlayabilmesi için uygulanması gereken kayma gerilimi değerine eşik kayma gerilmesi denir. Diğer bir tanımı ise elastik özelliğin kırıldığı andaki gerilimdir. Akışkana uygulanan eşik kayma gerilimi onun tamamen deforme olacağı anlamına gelmez. Bir borudan veya dış macunu gibi tüpten akan akışkanlarda kayma geriliminin en fazla olduğu yer duvar kenarıdır. Duvar çevresindeki kayma gerilimi akışkanın eşik kayma gerilimi olan τ_0 ' ı aştığında duvar çevresindeki çok ince bir film tabaka deforme olur. Akışkanın geriye kalan kısmı bu kaygan film tabakası üzerinden kayar (Helvacı ve Peker, 2013).

Kıvam ve eşik kayma gerilimi birbirlerine benzer kavramlardır. Kıvam akım sırasındaki dinamik ortam, kayma gerilimi ise akım başlamadan önceki statik şartlar için geçerli kavramlardır. Kayma gerilimi deformasyon hızının sıfıra eşit olduğu durumdaki, kıvam ise deformasyon hızının bire eşit olduğu durumdaki kayma gerilimi değeridir. Kıvam akışkan üzerine etki eden kuvvete veya kayma gerilimine karşı akışkanın direncini temsil eden bir kavramdır (Helvacı ve Peker, 2013).

Akışkanın şeklinin değiştirilmesine (deformasyona) gösterdiği direncin ölçüsüne viskozite indeksi (n) denir. Newton kuralına uyan akışkanlar için $n=1$ dir. Uygulanan kayma gerilimi altında akışkan deforme olur. Viskozite indeksinin sıfıra yaklaşması akışkanın elastik bir hale dönüştüğünü gösterir. Viskozite indeksi arttıkça akışkan ne kadar kıvamlı olursa olsun daha kolay deformasyona uğratılabilir. Statik ve dinamik şartlarda kayma gerilimine karşı dirençle deformasyona karşı direncin genel bir reolojik denklemde yer alması gerekir (Helvacı ve Peker, 2013). Kayma gerilimi altında bir akışkan iki şekilde davranır.

1) Newtonian akışkanlar

Newtonian akışkanlarda; Kayma viskozitesi, kayma gerilmesinin değişiminden etkilenmez. Viskozite, kayma zamanından bağımsızdır ve kayma işlemi sonlandırıldığında, akışkan içerisindeki gerilme sıfıra düşer. Farklı deformasyon koşullarında sabit bir büyüklük olan viskoziteler arasında, daima bir oran bulunur (Güler, 2010). Şekil 2.9' da gösterildiği gibi aralarında dx mesafesi olan iki tabaka arasında bir akışkan olduğu biliniyor. Üstteki tabakaya bir F kuvveti uygulandığında bu kuvvete eşit ve ters yönde bir iç sürtünme kuvveti ile denge oluşur (Yeğiner, 2014).



Şekil 2.9. Newtonian akışkan modeli

Şekil 2.9’ da görüldüğü üzere etki eden kuvvet kayma gerilimine neden olur. Bu durumda birim alana etki eden kuvvet;

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

şeklinde gösterilir. Hızın plakalar arasındaki mesafeye oranına kayma hızı denir.

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dx} \quad (2.4)$$

Yukarıda ifade edildiği gibi gösterilir. Kayma gerilimi ile kayma hızının orantılı olarak artması viskozite olarak tanımlandığından, burada viskozite akışa karşı akışkanın göstermiş olduğu yönelim olarak açıklanır. Newtonian sıvılar için viskozite katsayısı aşağıdaki formülde belirtilmiştir (Yeğiner, 2014).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.5)$$

Denklemlerle ifade edilir. Non- newtonian akışkanlarda eğer akışkan kayma hızı ile ilişkili ise dinamik viskozite kayma hızından bağımsız ise kinematik viskozite olarak adlandırılır. Kinematik viskozite dinamik viskozitenin aynı sıcaklıktaki yoğunluğa bölünmesiyle;

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.6)$$

elde edilir (Yeğiner, 2014).

2) Newton yasasına uymayan akışkanlar

Viskoziteyi oluşturan kayma gerilimi ile kayma hızı oranının sıfır veya doğrusal olmadığı akışkanlara Newton yasasına uymayan (Non – newtonian) akışkanlar denir. Belirli bir sıcaklık ve basınç değerinde viskozite sabit değildir. Akışkanın kayma hızı, akış geometrisi ve akışkan elemanın kinematik özelliklerine bağlıdır. Şekil 2.10’ da Newton yasasına uymayan akışkanların reolojik davranışlarının sınıflandırılması verilmiştir (Anonymous.12 Oct, 2019).



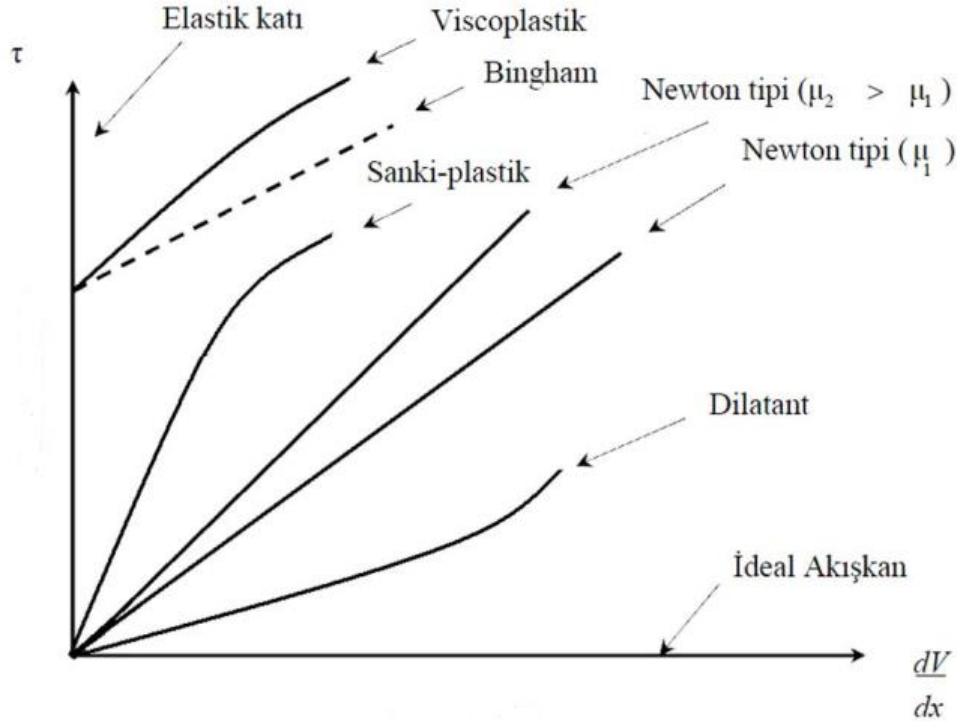
Şekil 2.10. Newton yasasına uymayan akışkanların reolojik davranış sınıflandırılması

2.2.3.2.1. Zamandan bağımsız akış davranışları

Zamandan bağımsız akış davranışlarına basit bir kayma kuvveti etki ettiğinde;

$$\dot{\gamma} = f(\tau) \text{ veya tersi olarak } \tau = g(\dot{\gamma}) \quad (2.7)$$

şeklinde yazılabilir. İfadeye bakıldığında belirli bir noktadaki kayma hızı değeri ile aynı noktadaki kayma gerilimi değeri belirlenebilir. Zamandan bağımsız akışkanların reolojik davranışları şekil 2.11’ de gösterilmiştir (Yeğiner, 2014).



Şekil 2.11. Zamandan bağımsız akışkanlar

2.2.3.2.1.1. Sanki-plastik (Kayma incelmesi)

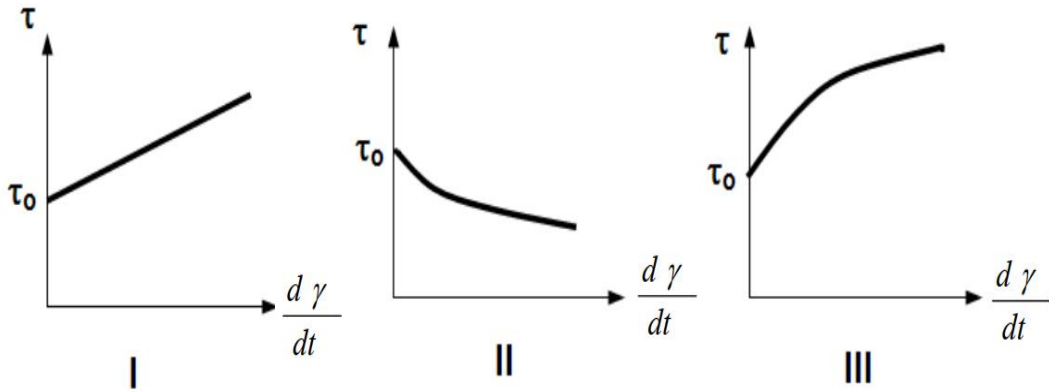
Sanki-plastik (pseudoplastik) davranışı gösteren akışkanlar, yalancı plastik veya kayma incelmesi olarak da adlandırılabilir. Viskozite indeksi (n) birden küçükse ($n < 1$) kayma gerilimi ve deformasyon hızı arttıkça akışkanın görünür viskozitesi azalır, deformasyon hızı tekrar azaldığı zaman akışkanın kayma gerilimi (veya viskozitesi) ilk değerinden sapmazsa bu tür akışkanlara sahte plastik akışkanlar denir (Helvacı ve Peker, 2013). Başka bir deyişle düşük kayma gerilimi etkisinde plastik, yüksek kayma gerilmesi etkisinde viskoz davranış gösterir. Sanki plastik akışkanlara boyalar, emülsiyonlar, çözücüler, doğal ve sentetik zamklar örnek olarak verilebilir. Sanki plastik akışkan davranışlarında kritik bir kayma değeri vardır. Sanki plastik akışkanlara kritik kayma gerilimi değerinden düşük kayma gerilimi uygulandığında katılık, kritik kayma gerilimi değerinden büyük gerilim uygulandığında ise akış gözlemlenir. (Helvacı ve Peker, 2013; Anonymous.12 Oct, 2019).

2.2.3.2.1.2. Dilatant akışkanlar (Kayma kalınlaşması)

Viskozite indeksi (n) birden büyükse ($n > 1$) kayma gerilimi ve deformasyon hızı arttıkça akışkanın görünür viskozitesi de artıyorsa bu tür akışkanlara dilatant akışkanlar denir. Ölçüm sırasında akışkan ortamına uygulanan kayma gerilimi altında, dağılmış fazı oluşturan tane veya damlaların sayıca artması viskoziteyi artırır (Helvacı ve Peker, 2013). Deformasyon hızı arttıkça akışa karşı direnç arttığından, dilatant bir akışkanı karıştırdıkça direncin artacağı söylenebilir. Dilatant akış davranışlarında, akışkan elemanları sık yerleşmiştir (Yeğiner, 2014). Bu akış davranışlarına kil, şeker çözeltileri nişasta - su karışımı, su - kum karışımı gibi süspansiyonlar ve yağlı boyalar örnek olarak verilebilir (Anonymous.12 Oct, 2019).

2.2.3.2.1.3. Plastik akışkanlar

Plastik davranışa sahip akışkanlar statik yükler altında katı gibi davranırken kayma gerilmesi uygulandığında harekete geçer ve akışkanlık gösterir. Durgun haldeki akışkanın akmasını sağlamak için gerekli minimum kuvvete eşik kayma gerilmesi denir. Plastik davranıştaki akışkanlara ketçap ve mayonez örnek olarak verilebilir. Şekil 2.12' de reolojik davranışı plastik akışkanlara uyan akışkanların akış modelleri verilmiştir (Anonymous.12 Oct, 2019).



Şekil 2.12. Plastik davranış modelleri I: eşik kayma değerini aştıktan sonra Newtonyen, II: eşik kayma değerini aştıktan sonra sanki plastik, III: eşik kayma değerini aştıktan sonra dilatant

Viskoplastik Akışkan

Viskoplastik akış davranışında akışkan akmaya başlamadan önce bir başlangıç akma gerilimine ihtiyaç vardır. Viskoplastik bir akışkana uygulanan kayma gerilimi başlangıç akma geriliminden küçük ise katı, büyük ise doğrusal ya da doğrusal olmayan bir akış davranışı sergiler. Eğer doğrusal bir davranış gösterirse Bingham plastik, doğrusal olmayan bir davranış sergiler ise sanki plastik akış davranışı görülür (Yeğiner, 2014).

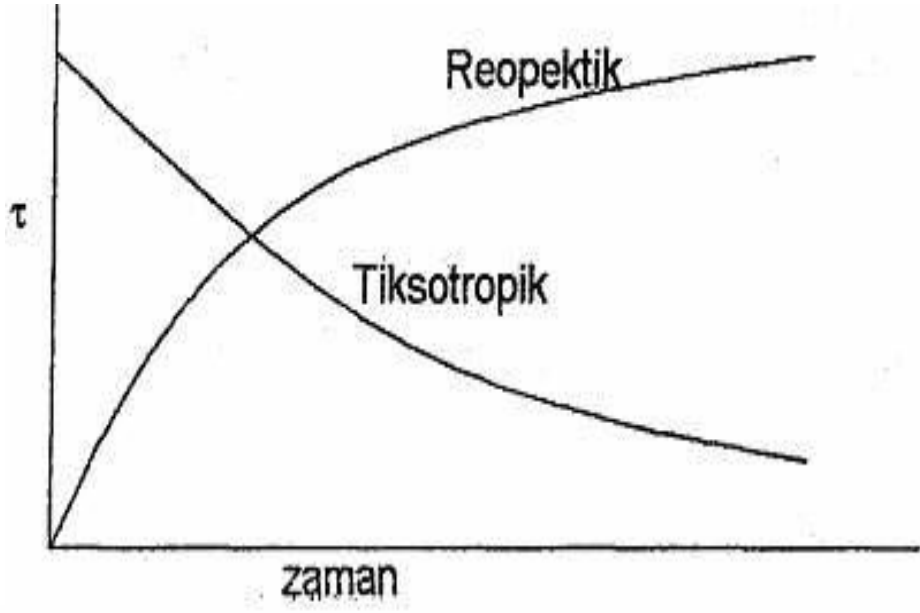
2.2.3.2.2. Zamana bağımlı akış davranışları

2.2.3.2.2.1. Tiksotropik akışkanlar

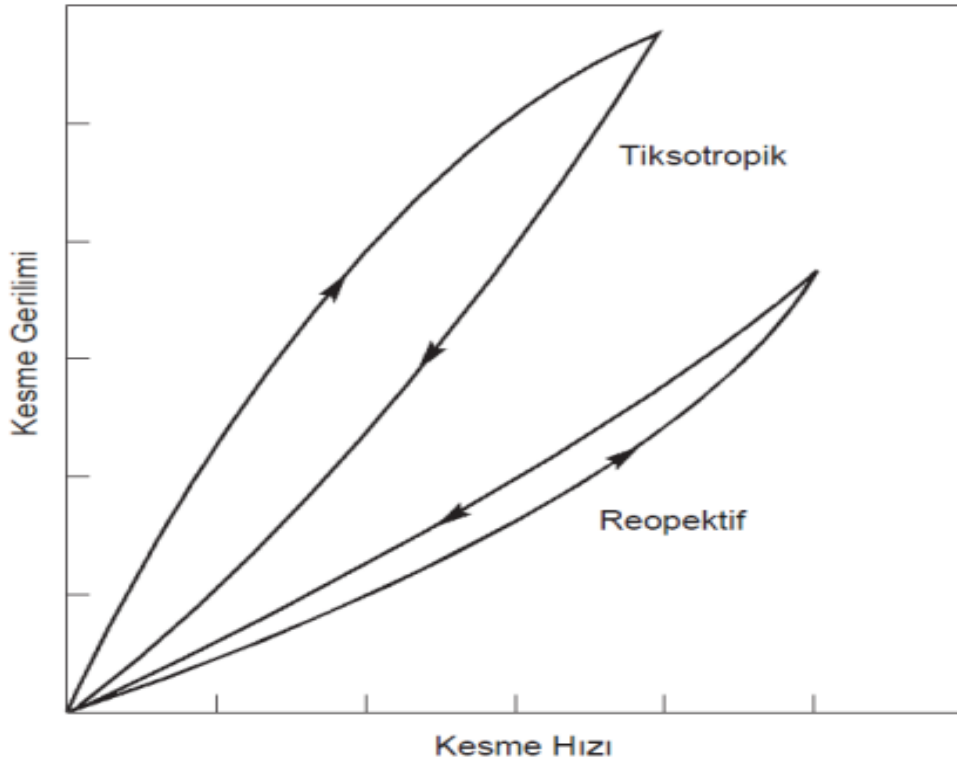
Kolloid biriminde tiksotropi en eski reolojik olaylardan biri olarak belirtilir. Tiksotropi terimi Peterfi'nin hücrede protoplazmanın sıvılaşacağını belirtmesiyle Freundlich tarafından açığa çıkarılmıştır. Yunanca kelimeler olan Thixis (sallama, çalkalama) ve trepo (dönme, değişme) kelimelerinin birleşmesiyle oluşmuştur. Tiksotropik akış davranışlarında akışkana uygulanan sabit bir kayma gerilimi ile akışkanın viskozitesi zamanla düşmektedir. Tiksotropik akışkanlarda kayma gerilimi ile viskoz özelliğin geri dönüşümlü bir biçimde azaldığı bilinmektedir. Tiksotropik davranışta olan akışkanlar disperse faz içeren heterojen yapılardır. Tiksotropik davranışlara taze beton, ağır mürekkepler örnek olarak verilebilir (Yeğiner, 2014).

2.2.3.2.2.2. Reopektik akışkanlar

Tiksotropik davranışın tersine reopektik davranışta akışkanın, sabit kayma gerilimi altında viskozitesi zamanla artar (Uysal, 2006). Uygulanan kayma gerilimi sonlandırıldığında akışkan eski haline döner. Reopektik akışkan davranışına yağlayıcılar, kireç taşı, insan vücudundaki eklem sıvıları, bentonit kil süspansiyonları, bazı koloidal eriyikler ve jips süspansiyonları örnek verilebilir [Chhabra,2010]. Şekil 2.13' de tiksotropik ve reopektik akışkanların kayma gerilimi – zaman ilişkisi (Yeğiner, 2014), Şekil 2.14' de ise kayma gerilimi – kayma hızı ilişkisi verilmiştir (Yılmaz, 2007).



Şekil 2.13. Tiksotropik ve Reopektik davranışlarda kayma gerilmesi - zaman ilişkisi



Şekil 2.14. Tiksotropik Akış Davranışı

2.2.3.3. Akışkanların plastik davranışlarının modellenmesi

2.2.3.3.1. Tek parametrelili modeller

Kayma gerilimi ile deformasyon hızı arasında doğrusal bir ilişki mevcut ise tek bir parametre akışkanın tüm reolojik özelliklerini tanımlayabilir. İki limit durumdaki, plastik ve elastik maddeler bu gruba uyar (Helvacı ve Peker, 2013).

Plastik maddeler, kayma gerilimi altında sürekli ve geriye dönüşü olmayacak şekilde deforme olduğundan Newton akışkanları olarak bilinir.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.8)$$

Viskozite (μ) bilindiği takdirde kayma gerilimi (τ) deformasyon hızı ($\dot{\gamma}$) arasındaki ilişkide bulunabilir (Yabansu, 2008).

Elastik maddeler, kayma gerilimi ile deformasyon doğru orantılıdır. Kayma gerilimi uygulandığı sürece madde deforme olur, fakat hiçbir zaman akmaz; kayma gerilimi kalktığında elastik maddeler anında eski şeklini alır.

$$\tau = G\gamma \quad (2.9)$$

Bu denklemde kayma modülü G, kayma gerilimi ile deformasyon oranı γ ($=\Delta L/L$) arasındaki orantı sabitidir.

2.2.3.3.2. İki parametrelili modeller

Akışkanın yapısı biraz daha karmaşık hale gelince kayma gerilimiyle deformasyon hızı arasındaki ilişkiyi açıklamakta viskozite gibi tek bir parametre yeterli olmaz. İkinci parametre, ya akışkanın yapısının kalıcı (plastik) deformasyona uğrayabilmesi için gereken minimum gerilim τ_0 ya da akışkanın viskozitesinin sabit kalmadığını gösteren bir indis (n) şeklindedir. Bu iki parametrenin bilinmesi, Bingham akışkanlarında (τ_0, μ) ve üstel kurala uyan akışkanlarda (K, n) tüm reolojik özellikleri tanımlayabilir (Helvacı ve Peker, 2013).

2.2.3.3.2.1. Bingham akışkanları

Akışkan içinde durgun halde varolan üst yapı uygulanan eşik kayma gerilimi çok çabuk dağılıyor ve yeniden yapılanması ölçüm süresine göre çok uzun zaman alıyorsa akışkan belli bir eşik kayma gerilimine sahip Newtonian akışkan gibi davranır:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (2.10)$$

Bu durumda viskoziteyi tanımlayan $\mu = \tau / \dot{\gamma}$ denklemi $\mu_g = (\tau - \tau_0) / \dot{\gamma}$ denklemine dönüşür. Bu denklemden eşik kayma gerilimi olan τ_0 değerinin, kayma gerilimi değeri olan τ' dan , büyük olması durumunda akışkanın akmayacağını anlayabiliriz. Akışkanda deformasyon yaratarak akımı sağlayan kayma gerilimi τ' nun kendisi değil eşik kayma gerilmesiyle arasındaki fark $(\tau - \tau_0)$ ' dır.

$\mu_g = (\tau - \tau_0) / \dot{\gamma}$ denkleminin sağ tarafı Bingham akışkanlarında görünür viskozite ile deformasyon hızı arasındaki ilişkiyi gösterir. Düşük deformasyon hızlarında akışkanın viskozitesi deformasyon hızındaki artışla ters orantılı olarak azalırken, yüksek deformasyon hızlarında denklemin sağ tarafındaki parantezde ikinci terim birinci terimin yanında ihmal edilebilecek kadar küçülür ve akışkan Newtonian akışkan gibi davranır. Bingham akışkanlarına dış macunları, ketçap, margarinler ve ağırlıkça % 4' ün altında kil içeren karışımlar örnek olarak verilebilir (Helvacı ve Peker, 2013).

2.2.3.3.2. 2. Üstel kurala uyan akışkanlar

Üstel kurala uyan akışkanların görünür viskoziteleri kayma gerilimiyle ilişkili olarak değişir. Akışkanın içinde oluşturulan deformasyon kayma geriliminin $1/n'$ ci üssü ile orantılıdır:

$\dot{\gamma} \propto \tau^{1/n}$ denklemi düzenlenerek,

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.11)$$

şeklinde yazılır. Bu denklemde kullanılan K simgesi akışkanın kıvamının (koyuluğunun) göstergesidir.

Newton akışkanlarının viskozitesi (μ) yerine kullanılır. Akışkanın kayma gerilimi altında ne kadar kolaylıkla deformasyona uğrayacağını viskozite indeksi (n) gösterir. K' nin birimi boyutsuz bir büyüklük olan viskozite indeksine bağlı olup [Pa.sⁿ] dir. Viskozitenin genel gösterimi,

$$\mu = \tau / \dot{\gamma} \quad (2.12)$$

şeklindedir. Yukarıda verilen kayma gerilimi denklemi, viskozite denkleminde yerine yazılarak düzenlenirse akışkanların görünür viskoziteleri;

$$\mu_g = K^{1/n} \tau^{n-1/n} \quad (2.12a)$$

veya

$$\mu_g = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.12b)$$

denklemleriyle ifade edilebileceği görülür (Helvacı ve Peker, 2013).

2.2.3.3.2. Çok parametrelili reolojik modeller

Yukarıda açıklanan basit reolojik modeller, her biri kendi başına Newton kuralına uymayan akışkan ve maddelerin karıştırılmasıyla oluşan karmaşık yapıdaki akışkanların davranışını açıklamakta yeterli olmadığı için kullanılamaz. Bu tür bir durumda akışkanların reolojik davranışları çok parametrelili modellerle açıklanabilir (Helvacı ve Peker, 2013).

2.2.3.3.2.1. Herschel-Bulkley modeli

Tiksotropik akışkanlarda deformasyon oluşturabilmek için bir eşik kayma gerilimine ihtiyaç varsa akışkanın bu davranışı Herschel Bulkley reolojik modeli ile açıklanır.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (2.13)$$

Bu denklemde üç parametre (τ_0 , K, n) kullanılarak kayma geriliminin deformasyon hızıyla değişimi açıklanmıştır.

Herschel Bulkley modeline uyan akışkanların görünür viskozitesi,

$$\mu_g = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0 + K\dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.14)$$

Denklemleri ile verilir. Viskozite iki limit durum için değişir.

- 1. $n \rightarrow 1$:** Deformasyon hızı arttıkça akışkanın viskozitesi öncelikle azalır; deformasyon hızı daha fazla artarsa görünür viskozite denkleminin birinci terimi sifira yaklaşacağından viskozite değeri sabitlenir ve akışkan Bingham plastiği gibi davranır.
- 2. $n \rightarrow 0$:** Akışkanın kayma gerilimi dinamik şartlarda deformasyon hızındaki değişime fazla duyarlı değildir. Deformasyon hızı ile viskozite arasında ters orantı olup deformasyon hızı arttıkça viskozite azalır.

$$\mu_g = \frac{\tau_0 + K}{\dot{\gamma}} \quad (2.15)$$

Karmaşık yapıdaki akışkana yüksek iç faz oranlı emülsiyonlar örnek olarak verilebilir (Helvacı ve Peker, 2013).

2.2.3.3.2.2. Casson modeli

Akışkanın viskozitesi, çok düşük ve çok yüksek deformasyon hızı limit durumlarında sabit kalıyor ve ara değerlerde üstel kurala uyuyor, ayrıca akışkan eşik kayma gerilimi gösteriyorsa yukarıda anlatılan modeller bu davranışı açıklayamaz. Casson bu davranışı açıklayabilmek için aşağıda ifade edilen denklemi önermiştir.

$$\mu^{0,5} = \mu_\infty^{0,5} + \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}\right)^{0,5} \quad (2.16)$$

Bu denklemde μ_∞ çok yüksek deformasyon hızlarında ulaşılabilen sabit viskozitedir. Boya performansının değerlendirilmesinde, kakao ve çikolatanın reolojik yönden kalite kontrolünde standart olarak Casson modeli kullanılır. Bazı durumlarda Casson modelinde viskozite indeksi (n), 0,5 değerinden sapma gösterebilir.

O halde genel denklem,

$$\mu^n = \mu_\infty^n + \left(\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}\right)^n \quad (2.16a)$$

veya

$$\tau^n = \tau_0^n + \mu_\infty^n \dot{\gamma}^n \quad (2.16b)$$

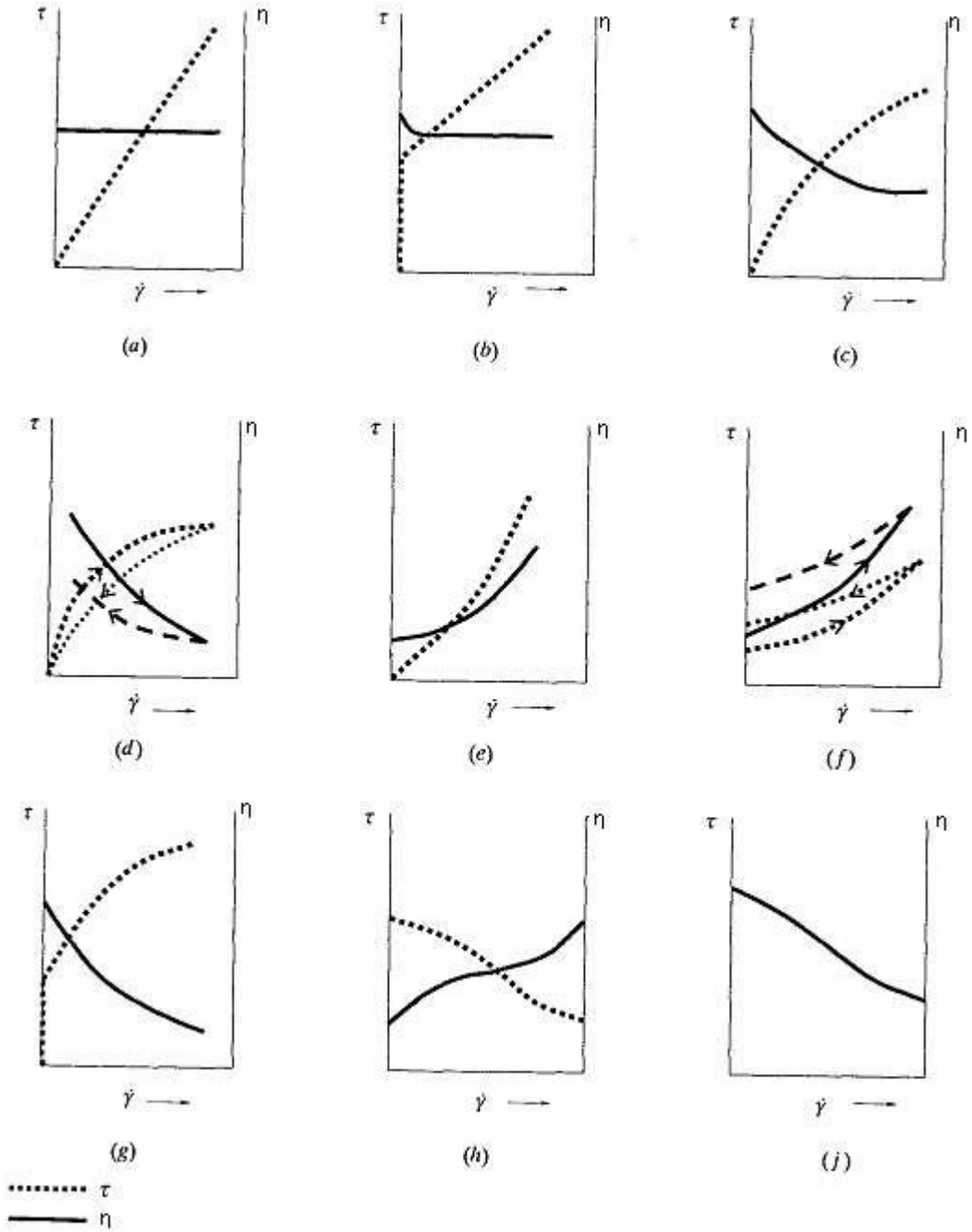
kayma gerilimi türünden yazılabilir (Helvacı ve Peker, 2013).

2.2.3.3.2. Cross modeli

Çok düşük ve çok yüksek deformasyon hızlarında üstel kurala uyan tiksotropik akışkanlar Newton akışkanları gibi davranıyorsa Cross modeli akışkanın reolojik davranışını açıklamaya en uygun model olabilir.

$$\mu = \mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + \alpha \dot{\gamma}^{2/3}} \quad (2.17)$$

Bu denklemde μ_0 , deformasyon hızının çok küçük, μ_∞ , deformasyon hızının çok büyük değerlerinde yaklaşılan sabit viskozite değerini verirken α ise bir reolojik sabit değerlerini verir. Böyle bir ifade de α sabiti bulunurken yaklaşık sıfır değerinden başlanarak olası kullanım aralığı içinde geniş bir deformasyon hızı aralığında viskozite ölçülerek μ_0 ve μ_∞ değerlerinin belirlenmesi gerekir. Deformasyon hızının uç değerlerinde viskozite arttırıcı maddelerin davranışını açıklamakta Cross modeli kullanılır. Şekil 2.15' de akışkanların reolojik davranış modelleri verilmiştir (Helvacı ve Peker, 2013; Yılmaz, 2007).



Şekil 2.15. Akışkanların kayma gerilimi (noktalı çizgiler) ve viskozitelerinin (siyah sürekli çizgiler) deformasyon hızıyla değişimlerine tipik örnekler: (a) Newton akışkanı, (b) Bingham plastiği, (c) Sahte plastik akışkan, (d) Tiksotropik akışkanlar, (e) Dilatant akışkanlar, (f) Reopektik akışkanlar, (g) Herschel-Bulkley modeline uyan akışkanlar, (h) Casson modeline uyan akışkanlar, (j) Cross modeline uyan akışkanlar

2.2.2.2. Manyetoreolojik akışkanların kullanım alanları

Modern kontrol sistemlerinin hayatımıza girmesiyle birlikte MR akışkanlar, otomotiv sektörü, depreme dayanıklı bina uygulamaları, tork transfer sistemleri, sağlık ve medikal alan olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. MR akışkanlar otomotiv sektöründe, otomobillerin süspansiyon, yolcu güvenlik ve fren sistemlerinde kullanılmaktadır. Otomobil süspansiyon sistemlerinde kullanılan MR akışkan amortisörlerdeki hidrolik akışkanın yerine geçerek sensörler aracılığı ile otomobilin ve yolun durumuna göre düşük enerji tüketerek yüksek sönümlenme ve titreşim kontrolünü sessiz çalışarak gerçekleştirir. Cadillac, Chevrolet, Ferrari, Audi gibi büyük markalar, MR akışkanları günümüz otomobillerinde tercih etmektedir. Şekil 2.16’ da otomobillerde MR akışkan süspansiyonlarının kullanımı şematik olarak gösterilmiştir (Uzun, 2008; Güler, 2010).

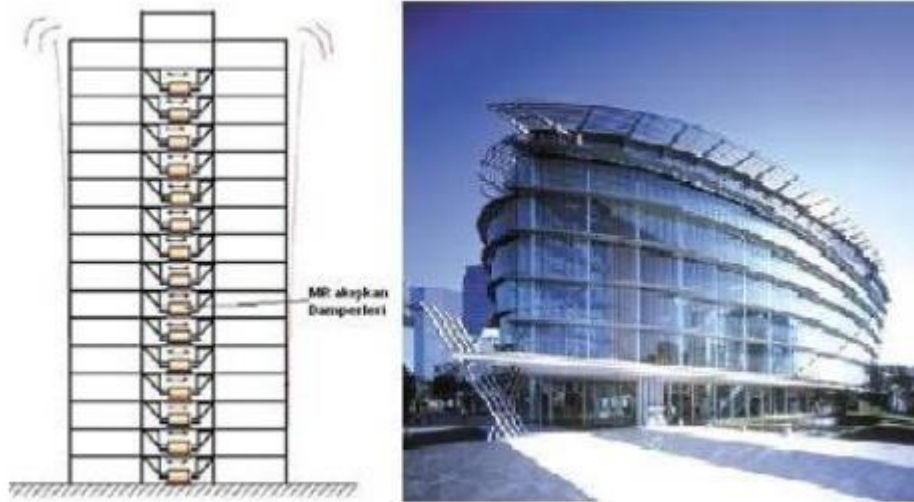


Şekil 2.16. MR akışkan süspansiyonlarının otomobillerde kullanımı

Şekilden de anlaşılacağı üzere; düşük sönümlenme, konforlu otomobillerin rahat kullanımını sağlarken yüksek sönümlenme; spor otomobillerin yola tutunmasını sağlar. Motorsiklet direksiyonlarında kullanılan MR damperler ise, motorsiklet direksiyonunda meydana gelebilecek istenmeyen hareketlerini sönümlenmek için kullanılırlar. Lord firmasının geliştirdiği “*The Motion Master Ride System*” MR akışkanın kullanıldığı bir sistem olup pasif süspansiyon sisteminin kısıtlamalarını yok eder.

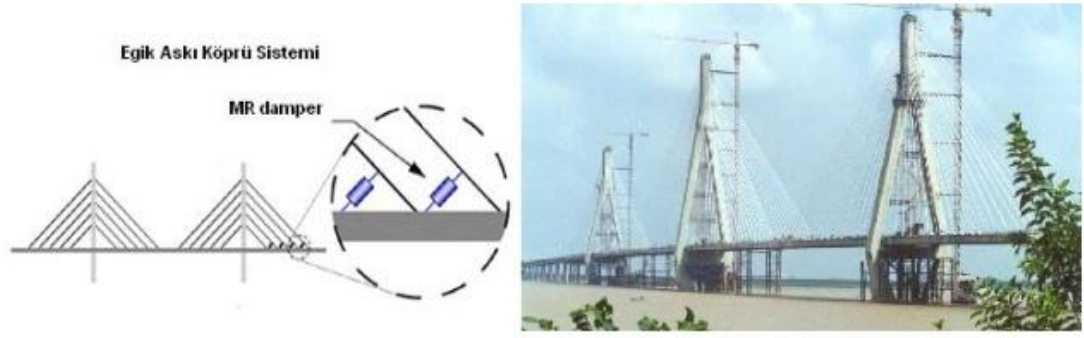
Pasif sistemlere göre değişim gösteren titreşim özelliğini tanımış ve bu doğrultuda anlık sönümlenme kuvveti uygulayarak değişen yol koşulları ve sürücü ağırlıkları için uygun titreşim sönümlenmesi ve şok koruması sağlayabilir. Buda günümüzdeki kamyonların birçoğunun sürücü koltuğunda bulunan, güvenlik tehlikesi oluşturan ve sürücü sağlığını olumsuz yönde etkileyen hava veya pasif süspansiyon sisteminden kaynaklanan sıkıntıların giderilmesini sağlayacak bir sistem olmuştur (Güler, 2010).

Yarı aktif titreşim kontrol sistemleri üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda oldukça artmıştır. Bu çalışmalar ile MR akışkan içeren yarı aktif kontrol sistemlerinin depremlere, fırtınalara ve afetlere karşı binaların verdiği tepkileri azaltılmasını sağlayan 300 kN maksimum sönümlenme kuvveti sağlayabildiği belirlenmiştir. MR damperlerin kullanıldığı binalara örnek Şekil 2.17’de verilmiştir (Uzun, 2008; Güler, 2010).



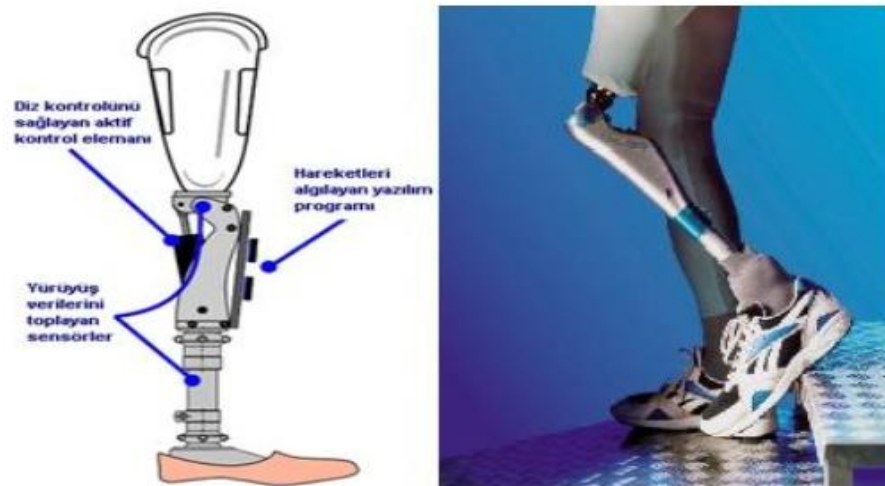
Şekil 2.17. MR damperlerin binalarda kullanımı ve Japonya Gelişen Bilimler Ulusal Müzesi uygulaması

MR akışkan damperleri kullanılan binalarda şiddetli rüzgarların ve depremlerin oluşturdukları sarsıntıları minimuma indirilir. Şekil 2.18 'de gösterilen köprü Çin'de inşa edilen MR damperlerin kullanıldığı The Dong Ting Lake köprüsüdür (Gadekar, 2017; Güler, 2010; Uzun, 2008).



Şekil 2.18. Çin'de inşa edilen MR damperlerin kullanıldığı The Dong Ting Lake köprüsü

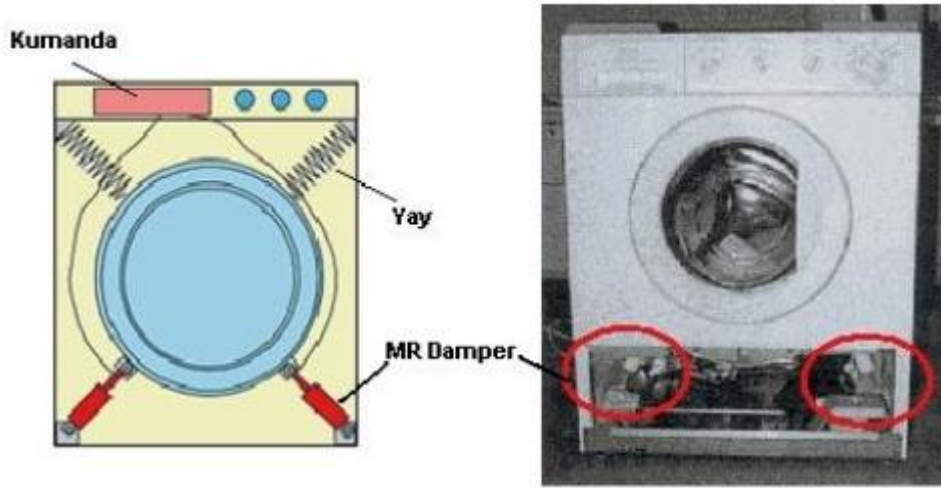
MR akışkanlar, uzay uygulamalarında da kullanılmaktadır. MR akışkan kullanılarak tasarlanan bir cihaz ile uyduları kalkış anında meydana gelen titreşim ve şok kaynaklı zararlardan korumak ve yörünge momentumu nedeniyle açığa çıkan çalkanmaları engellemek mümkündür. Son yıllarda MR akışkanların sağlık alanında kullanılması da gündemde olan bir diğer konudur. Bu doğrultuda kanser tedavisinde, tümörlü dokuya seyreltik MR akışkan çözeltisi verilerek ve tümörün önüne bir miktar yerleştirilerek tümöre giden kan beslemesi bloklanmakta tümörlü doku beslenemediğinden kısa bir süre sonra ölmektedir (Güler, 2010). Ayrıca bazı protezlerde de MR akışkan damperleri kullanılır. Şekil 2.19' da çok yavaş hareketlerde bile anlık hareket kontrolünü sağlayan protez diz gösterilmektedir (Gadekar, 2017; Güler, 2010).



Şekil 2.19. MR akışkan damperli protez diz

Bulunan ve geliştirilen en yeni optik parlatma yöntemi MR akışkan uygulamalarıdır. Polimetil metakrilat (PMMA), dairesel olefin polimer (COP), polikarbonat (PC) ve polistiren (PS) içeren MR akışkan malzemeler, optik parlatmada kullanılacak en uygun malzemelerdir. Fakat, her polimeri parlatmak için ona uygun başka bir MR akışkan gerekir, bu nedenle MR akışkan ile polimer arasındaki uyumu sağlama çalışmaları halen devam etmektedir (Güler, 2010).

Yıkama döngüsü yavaş; sıkma döngüsü hızlı olan çamaşır makinelerinde kullanılan MR akışkan damperleri makinenin yatay eksenine yerleştirildiğinde çamaşır makinesi yıkama durumundan sıkma durumuna geçerken oluşan farklı hızlar için farklı sönümlendirme kuvveti uygulayarak yüksek devirde açığa çıkan titreşimi ve sesi azaltmış olur. Şekil 2.20' de çamaşır makinelerinde MR akışkan damperinin kullanımını gösterilmiştir (Gadekar, 2017; Güler, 2010).



Şekil 2.20. MR akışkan damperini kullanarak tasarlanmış çamaşır makinesi

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, manyetoreolojik akışkan (MR) sentezlemek için taşıyıcı sıvı olarak kayısı çekirdeği yağı, katkı maddesi olarak gres yağı, manyetik partikül olarak demir içeriği yüksek lazer yazıcı toner tozu ve sentez yoluyla elde edilen Fe_3O_4 kullanılmıştır.

3.1.1. Manyetik malzeme

MR sentezlenirken iki farklı partikül boyutuna sahip manyetik partikül seçilmiştir. Küçük boyutlu manyetik partikül için piyasadan temin edilen demir içeriği yüksek (% 90) lazer yazıcı toner tozu ve daha büyük boyutlu partikül için aşağıda ifade edildiği şekilde Fe_3O_4 sentezlenmiştir.

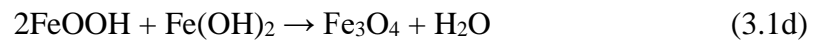
3.1.1.1. Demir sentezi

MR akışkan hazırlanırken demir, nikel, kobalt gibi manyetik özelliğe sahip katı partiküller kullanılmaktadır. Bu çalışmada MR akışkan hazırlanırken demir partiküllerinin kullanılması hedeflenmiştir. Bu doğrultuda $FeCl_3$ ve $FeO_4S.7H_2O$ kimyasallarından 7'şer gram tartılarak bir behere alınır. Üzerine bir miktar saf su eklenerek dijital karıştırıcıda 24 saat karıştırılır ve turuncu renkte homojen bir çözelti elde edilir. % 30' luk NH_4OH çözeltisine saf su eklenerek seyreltilir. Dijital karıştırıcıda karışma işlemi devam eden kimyasal çözeltinin üzerine seyreltik NH_4OH çözeltisi damla damla eklenir. Koyu renkli homojen bir karışım elde edilince karıştırma işlemi sonlandırılır. Beher, tabanı ile aynı büyüklüğe sahip bir mıknaşın üzerine bırakılarak oluşan demir partiküllerinin beherin alt kısmında birikmesi sağlanır. Üst kısımda biriken berrak faz süzülerek uzaklaştırılır. Demir partikülleri birkaç kez yıkandıktan sonra etüvde kurumaya bırakılır. Şekil 3.1' de demir sentezi işleminden görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.1. Demir partiküllerinin sentezi

Fe₃O₄ sentezi sırasında gerçekleşen reaksiyonlar;



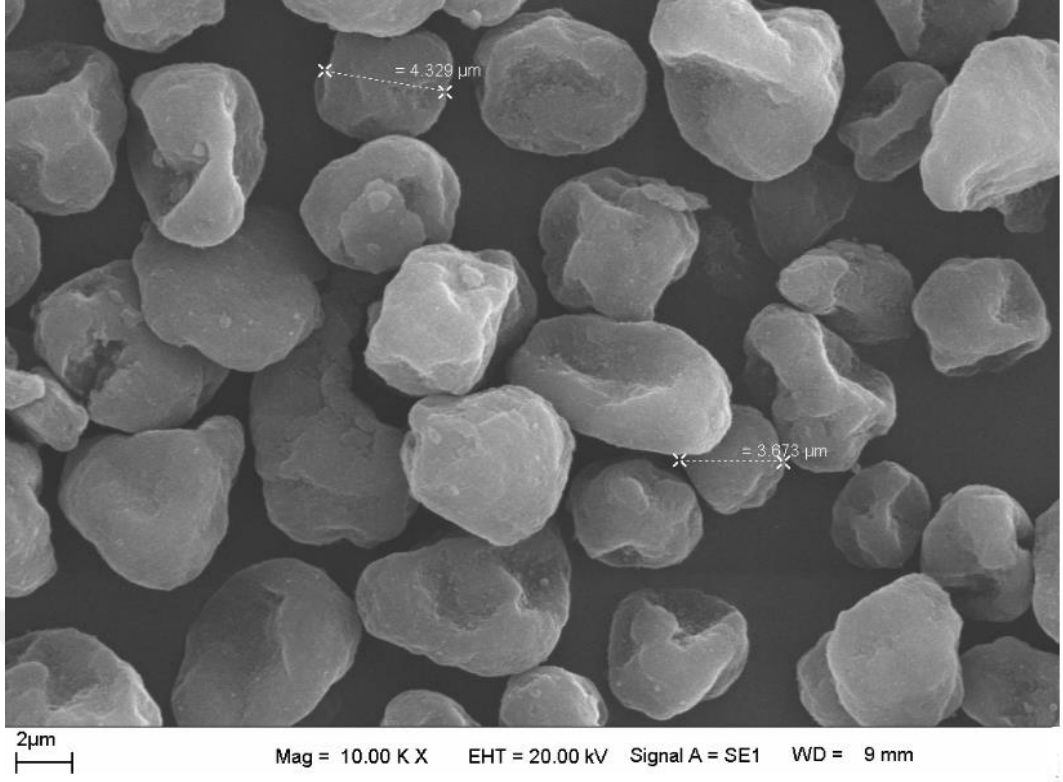
MR akışkan sentezlemek için kullanılacak olan manyetik partiküllerin boyutları SEM analizi yapılarak belirlenmiştir. Lazer yazıcı toner tozunun farklı büyütme değerleri ile elde edilen SEM analiz görüntüsü Şekil 3.2a - Şekil 3.2d' de verilmiştir.



Şekil 3.2a. Farklı büyütme değerlerindeki lazer yazıcı toner tozunun SEM görüntüsü



Şekil 3.2b. Farklı büyütme değerlerindeki lazer yazıcı toner tozunun SEM görüntüsü

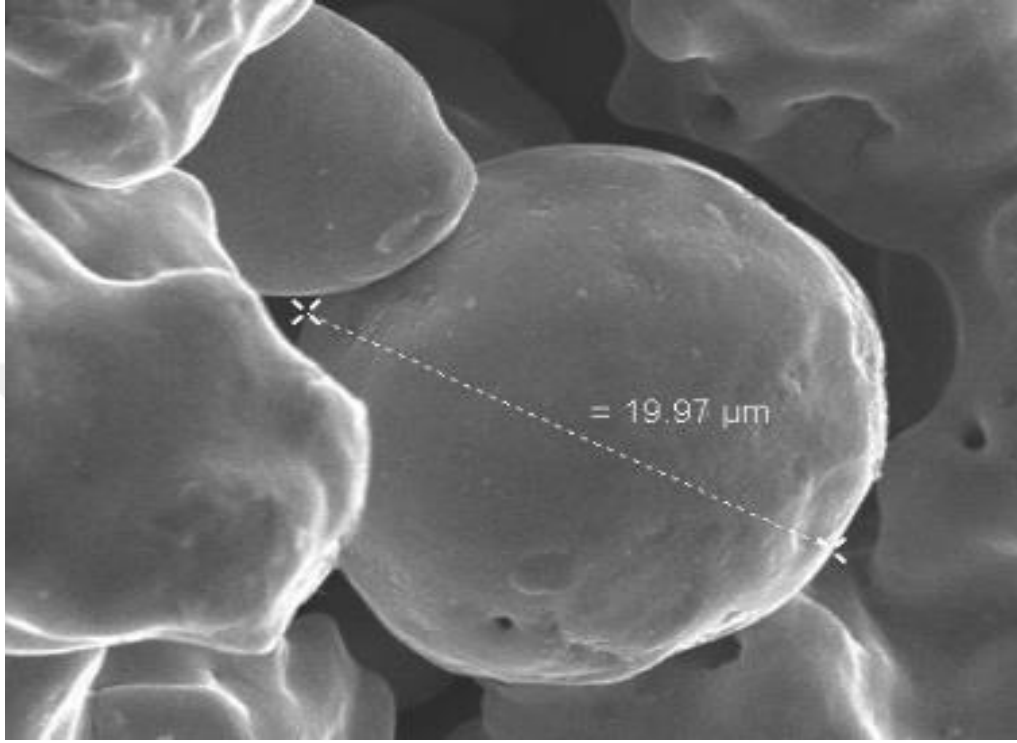


Şekil 3.2c. Farklı büyütme değerlerindeki lazer yazıcı toner tozunun SEM görüntüsü



Şekil 3.2d. Farklı büyütme değerlerindeki lazer yazıcı toner tozunun SEM görüntüsü

SEM analiz sonuçları ile kullanılan lazer yazıcı toner tozunun partikül büyüklüğü yaklaşık olarak 2,893 – 10,31 μm aralığında belirlenmiştir. Sentezlediğimiz Fe_3O_4 partiküllerinin farklı büyütme değerlerindeki SEM analiz görüntüsü ise Şekil 3.3’ de verilmiştir.



100 μm | Mag = 500 X EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 WD = 10 mm

Şekil 3.3. Farklı büyütme değerlerindeki Fe_3O_4 partiküllerinin SEM görüntüsü

SEM analiz sonuçları ile sentezlediğimiz Fe_3O_4 bileşiğinin partikül büyüklüğü yaklaşık olarak 20 μm belirlenmiştir.

3.1.2. Taşıyıcı sıvı

MR akışkanların temel maddesi olan taşıyıcı sıvı olarak Malatya ili ve çevresinde bolca bulunan ve kolaylıkla piyasadan temin edilebilen kayısı çekirdeği yağı kullanılmıştır.

3.1.3. Katkı Maddesi

Katkı maddesi olarak kullanılan gres yağı yardımı ile taşıyıcı sıvı ile manyetik tanecik arasındaki yoğunluk farkı dengelenerek, manyetik taneciklerin sıvı içerisinde homojen dağılmaları sağlandı.

3.2. Manyetoreolojik Akışkanların Sentezlenmesi

Bu çalışmada sentezlenen MR akışkan için iki farklı boyutta manyetik partikül kullanılmıştır. Manyetoreolojik akışkan hazırlanırken toplam çözelti miktarları 50 gram olarak belirlenerek içerisine eklenen katkı maddesi oranı %12,5' te sabit tutuldu. Her iki partikül boyutu için, manyetik tanecik konsantrasyonları %20, %30 ve %40 olmak üzere 3 farklı tanecik konsantrasyonuna sahip 6 çeşit MR akışkan sentezlenmiştir. Taşıyıcı sıvı olan düşük yoğunluktaki kayısı çekirdeği yağının içerisine taşıyıcı sıvı ile manyetik tanecik arasındaki yoğunluk dengesini sağlaması amacıyla yüksek yoğunluktaki gres yağı katkı maddesi olarak eklendi. Taşıyıcı sıvı ve katkı maddesi manuel karıştırıcıda 500 rpm de 30 dakika karıştırıldı. Viskozitesi artan bu karışımın içerisine manyetik partiküller eklenerek homojen bir karışım elde etmek için tekrar 500 rpm de bir saat daha karıştırıldı. Farklı konsantrasyon değerleri için sentezlenen MR akışkanları oluşturan maddelerin kütle oranları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

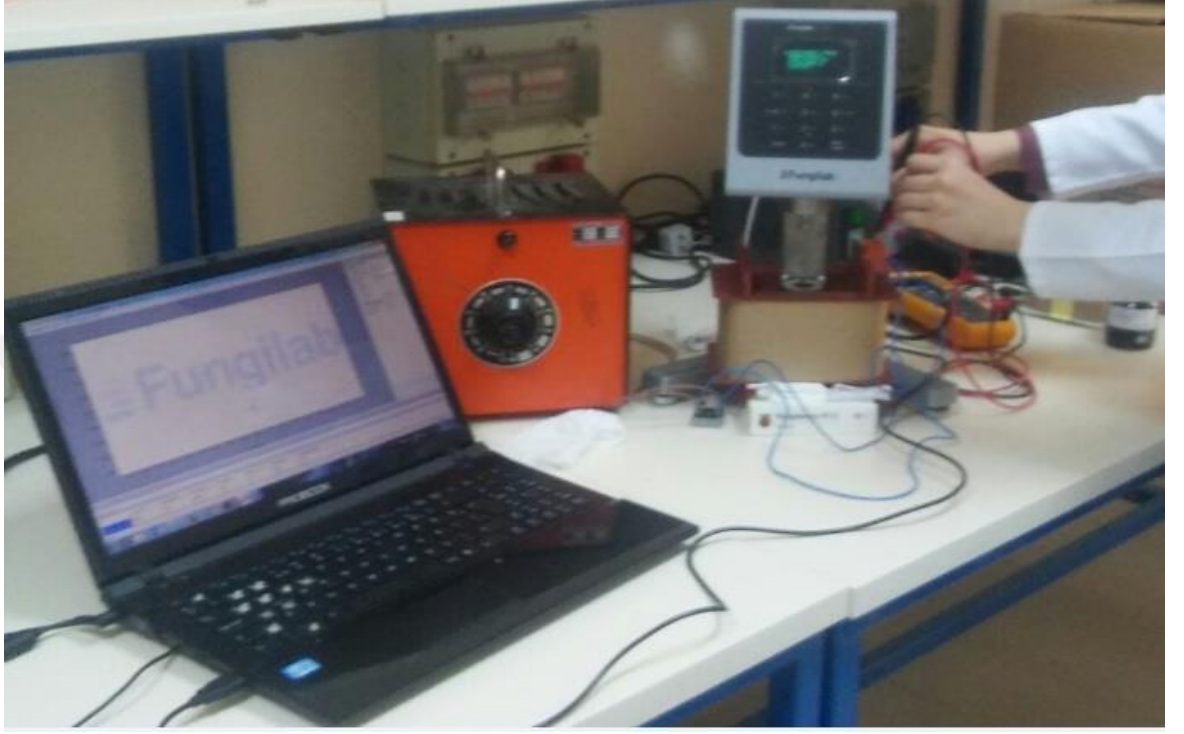
Çizelge 3.1. Farklı konsantrasyonlar için MR akışkan içeriğindeki madde miktarları

Tanecik Konsantrasyonu	Karışım Miktarı (g)	Taşıyıcı Sıvı (g)	Manyetik Partikül (g)	Katkı Maddesi(g)
%20	50	33,75	10	6,25
%30	50	28,75	15	6,25
%40	50	23,75	20	6,25

3.3. Manyetoreolojik Akışkanların Reolojik Özelliklerinin Tayini

Hazırlanan MR akışkanın reolojik özelliklerini belirlemek için Fungilab marka dönel viskozimetre kullanılmıştır. Dönel viskozimetrenin test bölgesine manyetik alan oluşturması amacıyla uygun büyüklükte bir bobin takılmıştır. Farklı manyetik alanlarda akım verilerek dönel viskozimetrede ölçümler yapılmıştır. Üç farklı konsantrasyon ve iki farklı manyetik partikül boyutu için sentezlenen MR akışkanların manyetik alanlı ve manyetik alansız ortamlarda ölçümleri yapıldı. Dönel viskozimetrede akışkanların manyetik alanlı ve manyetik alansız ortamlar için kayma gerilimi ve viskozite değerleri elde edilmiştir.

Her sonuç için kayma hızına karşı kayma gerilimi grafikleri çizilmiştir. Sentezlenen MR akışkanın reolojik davranışının tayin edildiği düzenek Şekil 3.4' da gösterilmiştir.



Şekil 3.4. MR akışkanın reolojik davranış tayini için hazırlanan düzenek

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

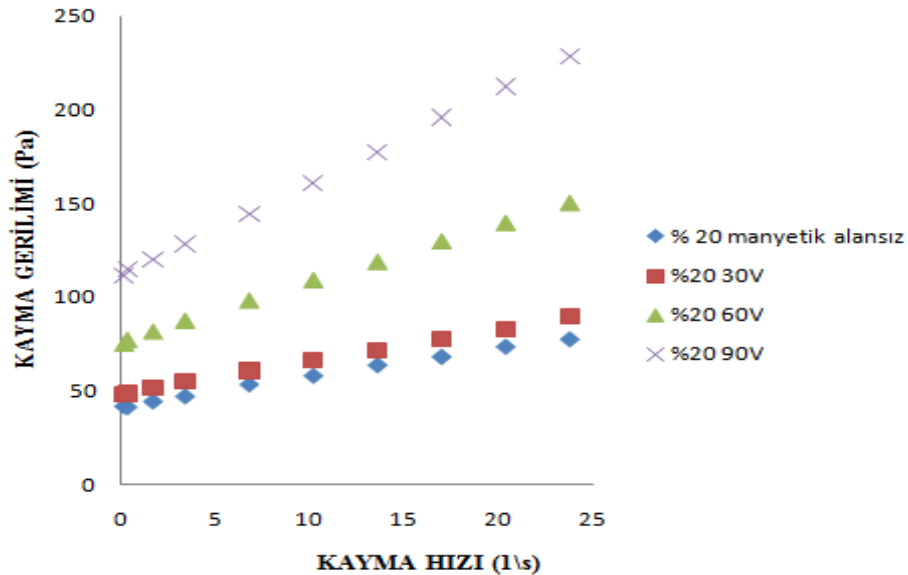
4.1. Manyetoreolojik Akışkanların Reolojik Özellikleri

Sentezlenen MR akışkanların reolojik özellikleri Bölüm 3’ de ifade edildiği şekilde viskozitenin manyetik alana bağlı değişimini ölçmek için dönel viskozimetrenin test bölgesine uygun miktarda MR akışkan enjekte edilerek manyetik alanlı ve manyetik alansız durumlar için belirlenmiştir.

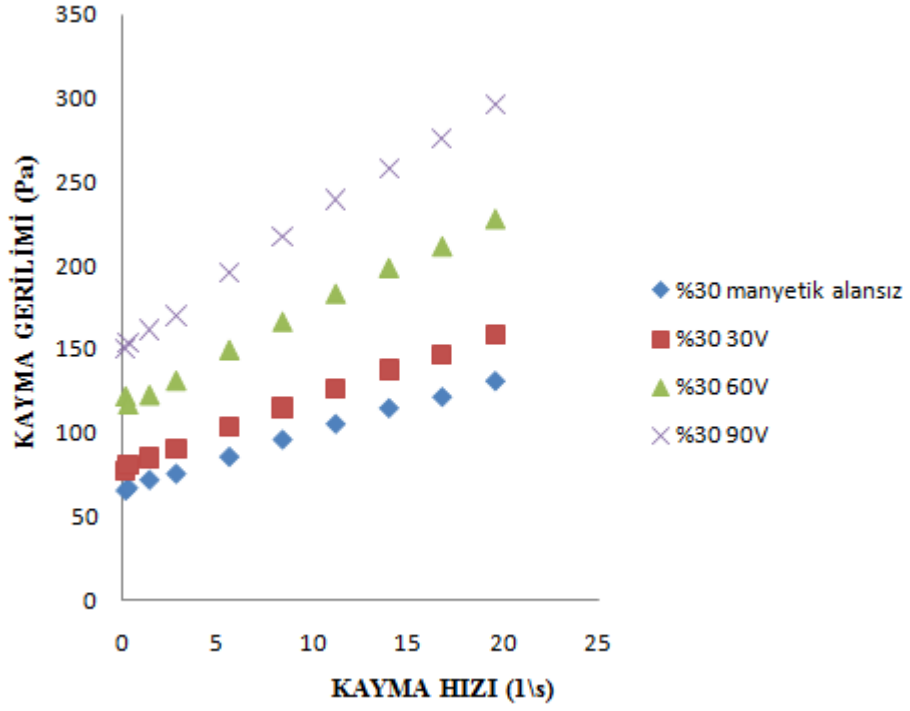
Farklı partikül boyutlarına sahip MR akışkanların, her konsantrasyon değeri için manyetik alansız, 30V, 60V ve 90V manyetik akım değerlerinde sonuçlar elde edilmiştir. Viskozimetrenin okuma yaptığı her aralığın kendi içinde ortalaması alınarak MR akışkanların, kayma hızı değerlerine karşı kayma gerilimi değerleri grafiğe geçirilerek reolojik model ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

4.1.1. Manyetik akışkan parametrelerinin reolojik özelliklere etkisi

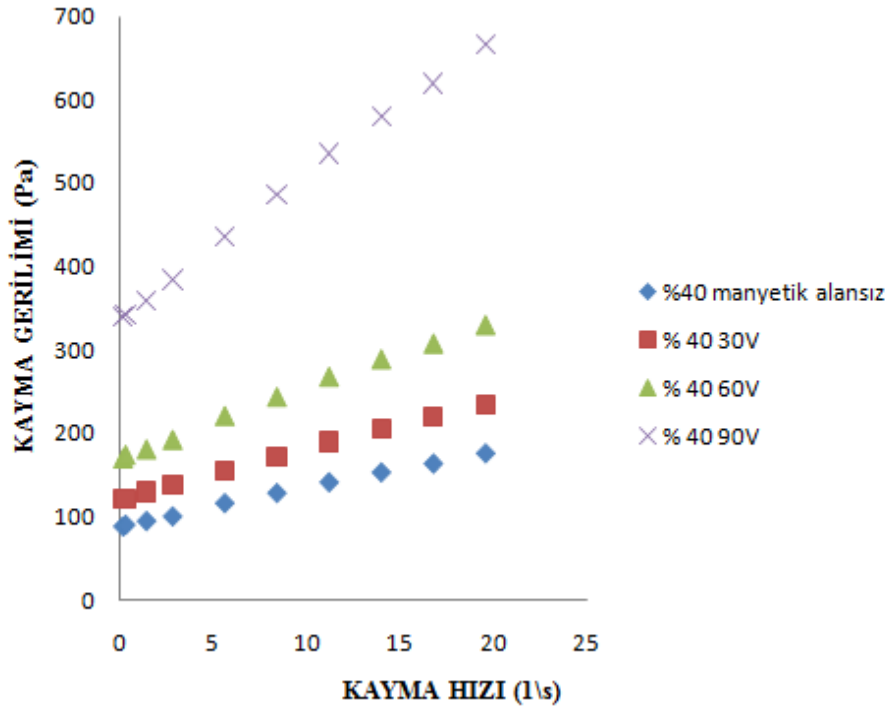
İki farklı boyutta demir partikülü içeren MR akışkan örneklerinin reolojik davranışları hazırlanan düzenekte incelenmiştir. Şekil 4.1-Şekil 4.3’ de lazer yazıcı toner tozu ile hazırlanan MR akışkanların farklı konsantrasyon ve manyetik alan şiddetlerindeki kayma gerilimlerine karşı kayma hızları grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.1. %20 oranında lazer yazıcı toner tozu içeren MR akışkanın reolojik davranışı

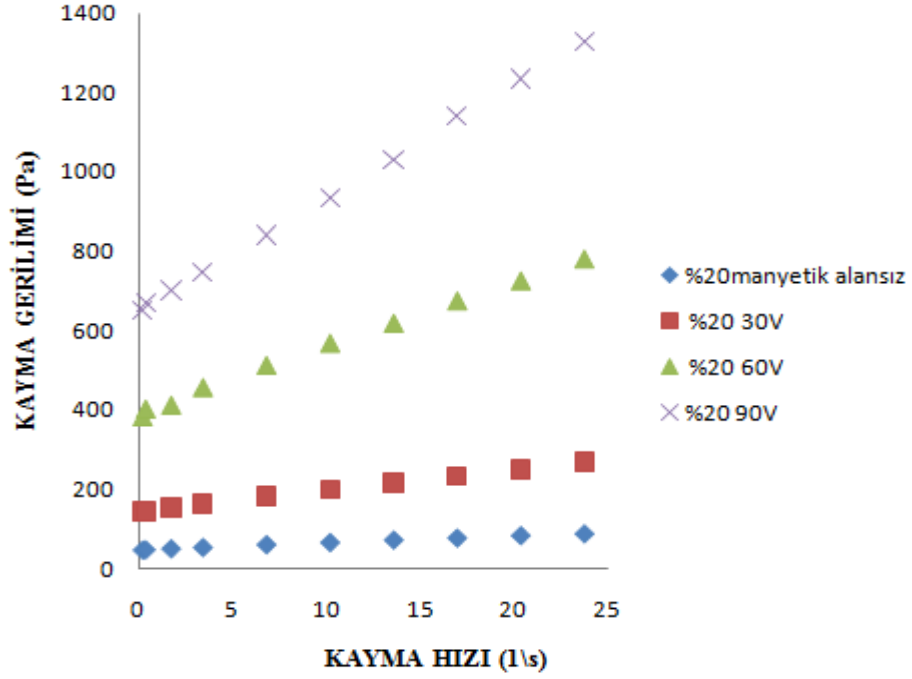


Şekil 4.2. %30 oranında lazer yazıcı toner tozu içeren MR akışkanının reolojik davranışı

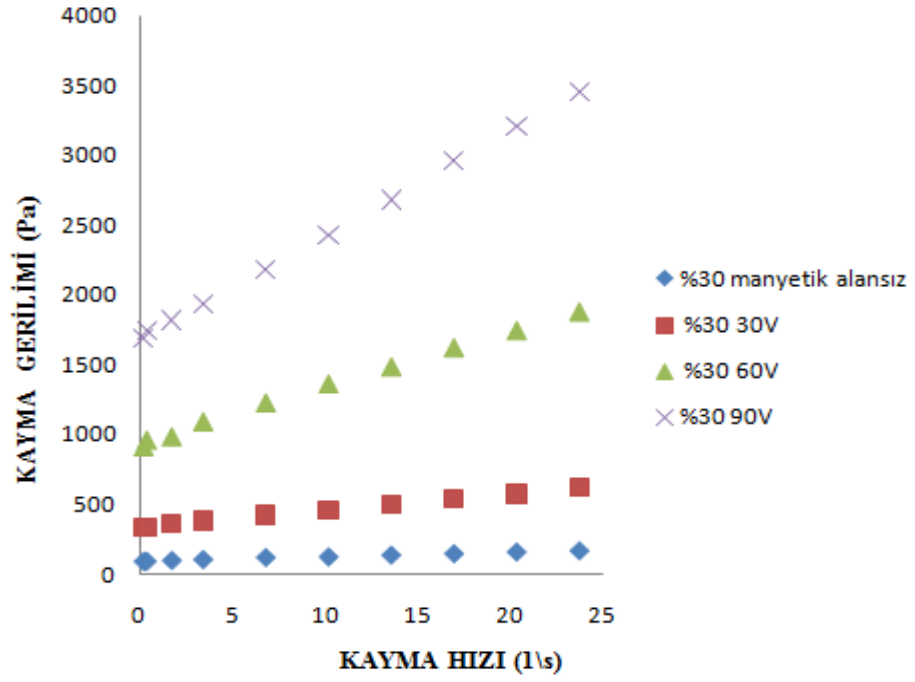


Şekil 4.3. %40 oranında lazer yazıcı toner tozu içeren MR akışkanının reolojik davranışı

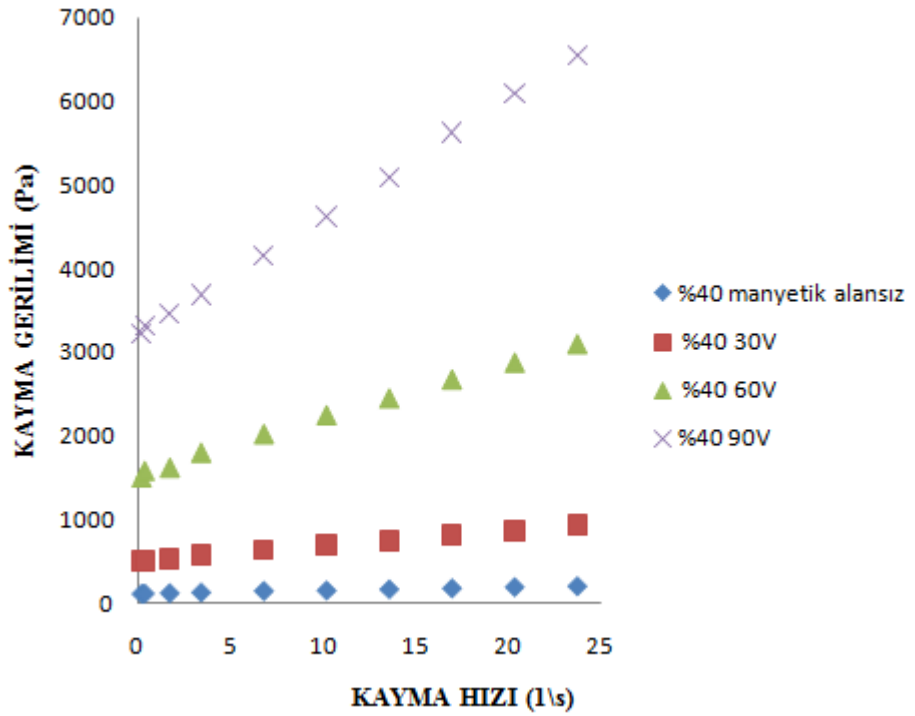
Şekil 4.4 - Şekil 4.6' da Fe_3O_4 ile hazırlanan MR akışkanlarının farklı konsantrasyon ve manyetik alan şiddetlerindeki kayma gerilimlerine karşı kayma hızları grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.4. %20 oranında Fe_3O_4 içeren MR akışkanının reolojik davranışı



Şekil 4.5. %30 oranında Fe₃O₄ içeren MR akışkanın reolojik davranışı



Şekil 4.6. %40 oranında Fe₃O₄ içeren MR akışkanın reolojik davranışı

Grafikler incelendiğinde MR akışkan sentezlenirken belirlenen parametrelerin akışkanın genel reolojik davranışında bir değişiklik oluşturmadığı tüm MR akışkan örneklerinin Bingham modeline uyduğu belirlenmiştir. Ancak manyetik partikül boyutu, partikül konsantrasyonu ve manyetik alan şiddeti arttıkça MR akışkanın akımı zorlaştığından akışın başlaması için uygulanması gereken eşik kayma gerilimi değerinin arttığı görülür. Çizelge 4.1’ de lazer yazıcı toner tozu ile hazırlanan MR akışkanların, Çizelge 4.2’ de sentezlediğimiz Fe₃O₄ ile hazırlanan MR akışkanların farklı konsantrasyon ve manyetik alan şiddetlerindeki reolojik özellikleri verilmiştir.



Çizelge 4.1. Lazer yazıcı toner tozu ile hazırlanan MR akışkanların reolojik özellikleri

Konsantrasyon	Akım (V)	Eşik Kayma Gerilimi (Pa)	Viskozite (Pa.s)	R ²	Bingham Denklemi $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$
%20	0	41,67	1,563	0,997	$\tau = 1,563\dot{\gamma} + 41,67$
	30	48,21	1,717	0,999	$\tau = 1,717\dot{\gamma} + 48,21$
	60	76,28	3,131	0,999	$\tau = 3,131\dot{\gamma} + 76,28$
	90	100,9	5,524	0,999	$\tau = 5,524\dot{\gamma} + 100,9$
%30	0	65,89	3,377	0,997	$\tau = 3,377\dot{\gamma} + 65,89$
	30	79,10	4,079	0,998	$\tau = 4,079\dot{\gamma} + 79,13$
	60	115,3	5,822	0,997	$\tau = 5,822\dot{\gamma} + 115,3$
	90	177,7	5,886	0,995	$\tau = 5,886\dot{\gamma} + 177,7$
%40	0	89,25	4,440	0,998	$\tau = 4,440\dot{\gamma} + 89,25$
	30	121	5,906	0,998	$\tau = 5,906\dot{\gamma} + 121,0$
	60	170	8,271	0,997	$\tau = 8,271\dot{\gamma} + 170,0$
	90	339,8	16,86	0,998	$\tau = 16,86\dot{\gamma} + 339,8$

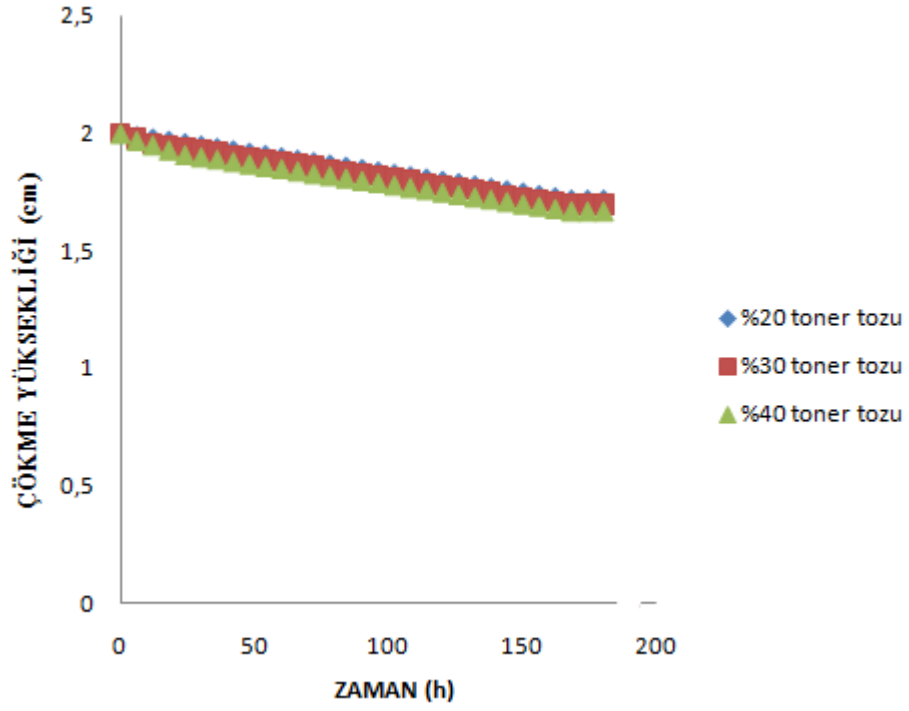
Çizelge 4.2. Sentezlenen Fe₃O₄ ile hazırlanan MR akışkanların reolojik özellikleri

Konsantrasyon	Akım (V)	Eşik Kayma Gerilimi (Pa)	Viskozite (Pa.s)	R ²	Bingham Denklemi $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$
%20	0	45,84	1,720	0,997	$\tau = 1,720\dot{\gamma} + 45,84$
	30	144,6	5,152	0,999	$\tau = 5,152\dot{\gamma} + 144,6$
	60	390,3	16,64	0,997	$\tau = 16,64\dot{\gamma} + 390,3$
	90	650,1	28,41	0,999	$\tau = 28,41\dot{\gamma} + 650,1$
% 30	0	96,72	3,18	0,994	$\tau = 3,18\dot{\gamma} + 96,72$
	30	333,3	11,87	0,999	$\tau = 11,87\dot{\gamma} + 333,3$
	60	936,9	39,64	0,997	$\tau = 39,94\dot{\gamma} + 936,9$
	90	1690	73,87	0,999	$\tau = 73,87\dot{\gamma} + 1690,0$
% 40	0	116,0	3,816	0,994	$\tau = 3,816\dot{\gamma} + 116,0$
	30	500,0	17,81	0,999	$\tau = 17,81\dot{\gamma} + 500,0$
	60	1545,0	65,91	0,997	$\tau = 65,91\dot{\gamma} + 1545,0$
	90	3211,0	140,3	0,999	$\tau = 140,3\dot{\gamma} + 3211,0$

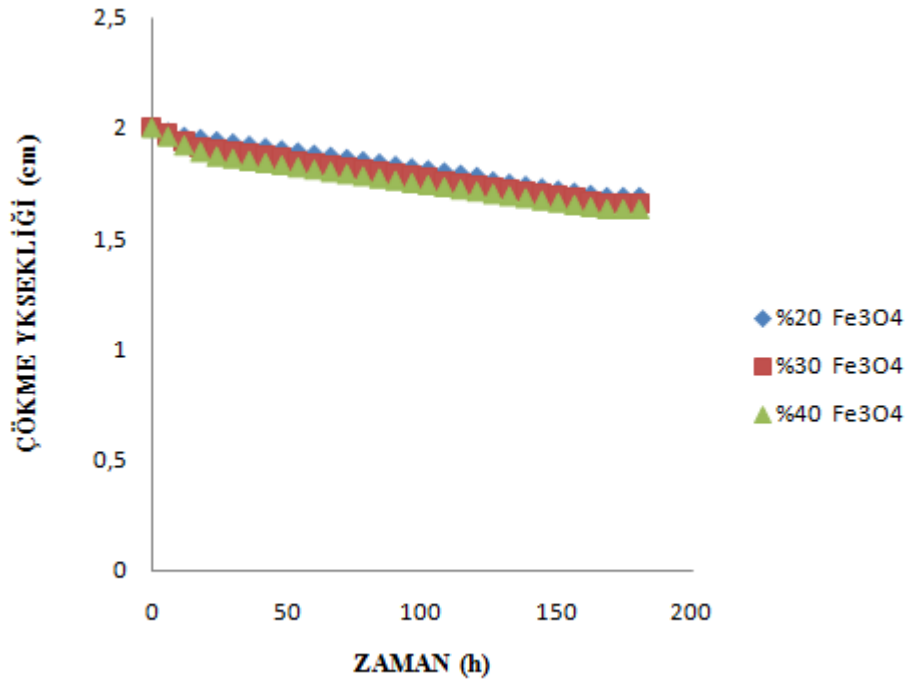
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde manyetik alanlı ve manyetik alansız ortamlarda konsantrasyonun artması ile kayma geriliminin yanı sıra viskozite değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumu taşıyıcı miktarı sabit kalıp manyetik tanecik miktarının artması akışkanın akımını zorlaştırır, manyetik alan uygulandığı ortamlar için ise manyetik tanecik konsantrasyonunun artması ile akışkan içinde daha fazla miktarda zincir dizilimi oluşacağından akışkanın akması zorlaşır şeklinde açıklayabiliriz. Manyetik partikül konsantrasyonu sabit kalıp partikül boyutu arttıkça partiküller akışkan içerisinde hareketi zorlaştığından akışkanın viskozitesi ve eşik kayma gerilimi değeri artar. Ayrıca manyetik alan şiddeti arttıkça akışkan içerisindeki manyetik partiküllerin zincir dizilimi kuvvetlendiğinden bu dizilimin deformasyonu zorlaşır ve akımın gerçekleşmesi için uygulanması gereken kayma gerilimi artar.

4.2. Manyetoreolojik Akışkanların Çökme Davranışları

MR akışkanlar sentezlenirken farklı yoğunluklardaki, taşıyıcı faz ve manyetik partiküllerden oluştuğundan taşıma veya depolama işlemleri sırasında oluşacak hareketsizlik sonucu manyetik partiküller çökebilir. Çöken MR akışkan iki faza ayrılır ve tekrar kullanılabilmesi için homojenliğinin sağlanması gerekir. MR akışkanın çökme davranışını gözlemlemek için farklı partikül boyutuna ve farklı partikül konsantrasyonuna sahip akışkanlar cam tüplerde çökmeye bırakıldı. Çökme davranışı süresince her 6 saatte bir cam tüpün üst kısmında biriken berrak fazın yüksekliği belirlendi. Başlangıç yüksekliğinden faz ayrımının sonlandığı ana kadar belirlenen değerler Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' de grafiğe geçirilmiştir.



Şekil 4.7. Lazer yazıcı toner tozu içeren MR akışkanın çökme davranışı



Şekil 4.8. Fe₃O₄ partikülleri içeren MR akışkanın çökme davranışı

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde manyetik partikül konsantrasyonu ve boyutu arttıkça MR akışkandaki çökme oranının arttığı görülür. Ancak bu çalışmada katkı maddesi olarak kullanılan gres yağı, taşıyıcı sıvı ile manyetik partiküller arasındaki dengeyi çok iyi sağladığından MR akışkanların çökme oranları oldukça düşüktür. Burada MR akışkanın çökme oranı, berrak fazın tüm akışkana oranı şeklinde tanımlanmıştır. Farklı manyetik partikül boyutu ve farklı manyetik partikül konsantrasyonlarında hazırlanan MR akışkanların çökme oranları hesaplanarak Çizelge 4.3’ de verilmiştir.

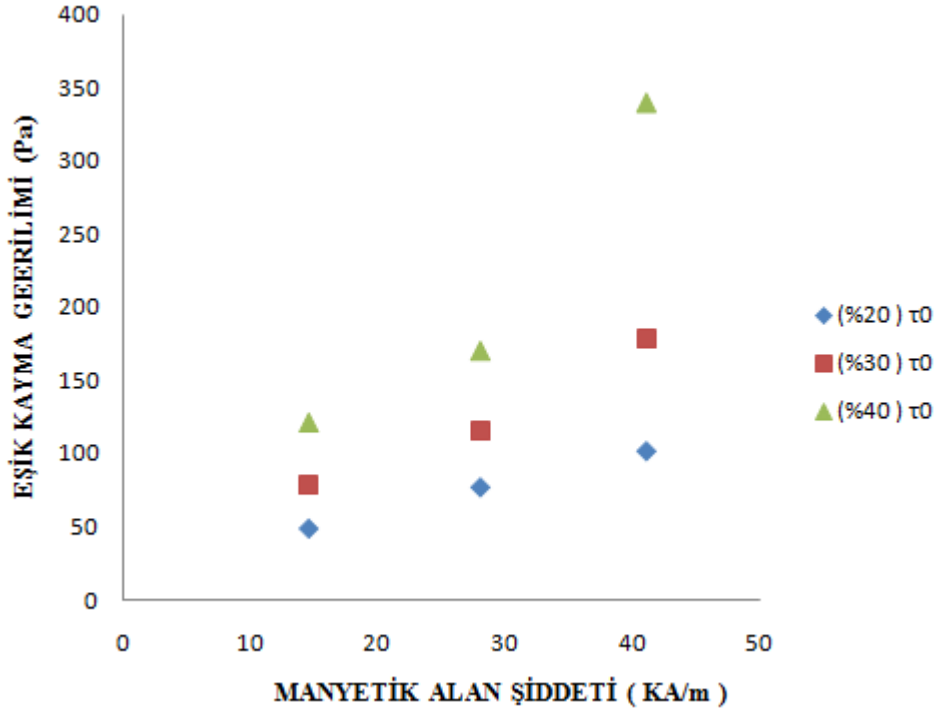
$$\text{Çökme Oranı} = \frac{h_b}{h} \times 100 \quad (4.1)$$

Çizelge 4.3. Farklı manyetik partikül boyutu ve farklı manyetik partikül konsantrasyonlarında hazırlanan MR akışkanların çökme oranları

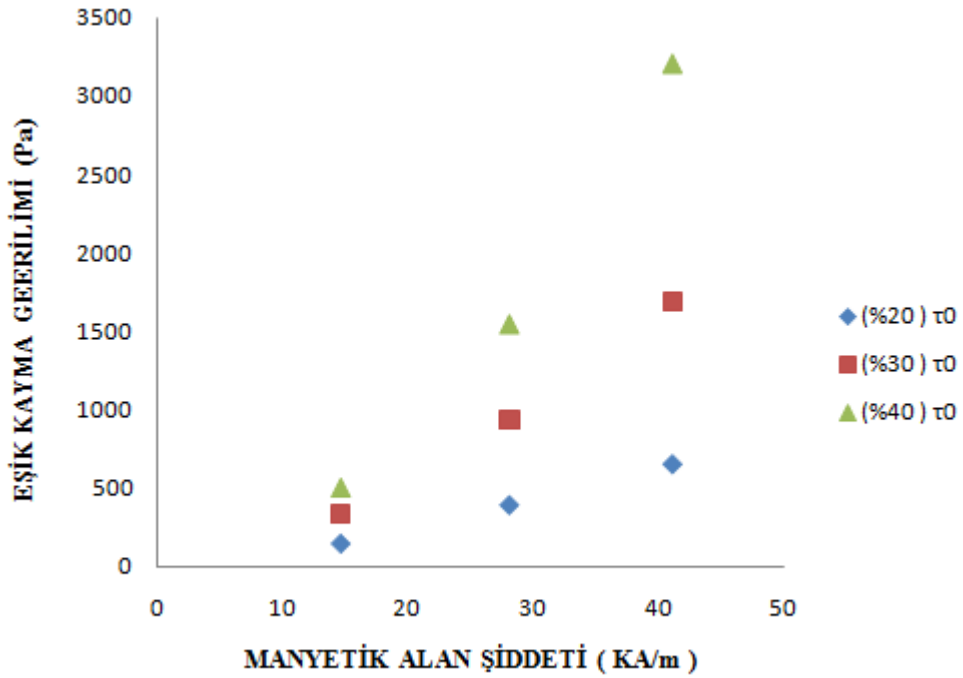
	Manyetik partikül konsantrasyonu (%)		
Manyetik partikül çeşidi	20	30	40
Lazer yazıcı toner tozu	% 14	% 15	% 16,5
Fe ₃ O ₄	% 15,5	% 17	% 18,5

4.3. MR Akışkanlarda Manyetik Alan Şiddetinin Eşik Kayma Gerilmesi Değerine Etkisi

Uygulanan manyetik alan şiddeti arttıkça MR akışkanın daha çok katılaştığını ve akımının zorlaştığını daha önce belirtmiştik. Şekil 4.9’ da lazer yazıcı toner tozu ve Şekil 4.10’ da Fe₃O₄ için manyetik alan şiddeti ile eşik kayma gerilmesi arasındaki ilişki grafiğe geçirilmiştir.



Şekil 4.9. Lazer yazıcı toner tozu için manyetik alanın eşik kayma gerilmesine etkisi



Şekil 4.10. Fe_3O_4 için manyetik alanın eşik kayma gerilmesine etkisi

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde MR akışkan içerisinde yer alan aynı manyetik alan şiddeti ve aynı manyetik partikül boyutuna sahip fakat konsantrasyonları farklı akışkanların, konsantrasyonu arttıkça manyetik partiküller daha sık dizildiğinden akımın gerçekleşmesini sağlamak için gerekli olan eşik kayma gerilimi değerinin arttığı, aynı konsantrasyon değerinde olmasına karşın uygulanan manyetik alan şiddetinin artmasının, akımın başlaması için gerekli olan eşik kayma gerilimi değerini arttırdığı ve yine aynı manyetik alan şiddeti ile aynı manyetik partikül konsantrasyon değerlerine sahip olmasına karşın manyetik partikül boyutu arttıkça akışkanın akmasını sağlayan eşik kayma gerilimi değerinin arttığı görülmüştür.

Eşik kayma gerilimi (τ_0) ile manyetik alan şiddeti (H) arasında aşağıda ifade edildiği şekilde bir bağıntı vardır:

$$\tau_0 = AH^b \quad (4.2)$$

Bu bağıntıda yer alan A ifadesi sabit bir katsayı ve b ifadesi ise manyetik alanın eşik kayma gerilimine bağlılığını gösteren bir üssü simgeler. Çizelge 4.4' de sentezlenen MR akışkanların manyetik partikül boyutu ve konsantrasyonundaki artışın manyetik alan şiddeti – eşik kayma gerilmesi arasındaki bağıntıya etkisi verilmiştir.

Çizelge 4.4. Manyetik partikül boyutu ve konsantrasyonundaki artışın manyetik alan şiddeti - eşik kayma gerilmesi arasındaki bağıntıya etkisi

Manyetik Partikül Çeşidi	Konsantrasyon	A	B	Denklem $\tau_0 = AH^b$
Lazer yazıcı toner tozu	% 20	7,132	0,712	$\tau_0 = 7,132 H^{0,712}$
	% 30	9,996	0,760	$\tau_0 = 9,996 H^{0,760}$
	% 40	8,895	0,946	$\tau_0 = 8,895 H^{0,946}$
Fe ₃ O ₄	% 20	2,923	1,460	$\tau_0 = 2,923 H^{1,460}$
	% 30	4,971	1,570	$\tau_0 = 4,971 H^{1,570}$
	% 40	4,089	1,789	$\tau_0 = 4,089 H^{1,789}$

Elde edilen veriler değerlendirildiğinde manyetik partikül konsantrasyonu arttıkça manyetik alanın eşik kayma gerilimine bağılılığını gösteren üssün arttığı görülür. Küçük boyutlu manyetik partiküller ile sentezlenen MR akışkanların üs değerleri 1' den küçük, büyük boyutlu manyetik partiküller ile sentezlenen MR akışkanların ise üs değerleri 1' den büyüktür.

5. SONUÇLAR

Teknolojide büyük ilerlemelerin kaydedildiği günümüzde MR akışkanlar oldukça önem kazanmıştır. Uygulanan manyetik alanın etkisiyle reolojik özellikleri hızla değişen bu akışkanlar geniş kullanım alanlarına sahiptir. MR akışkanlar mekanik sistemleri çok kısa sürede kontrol altına aldığı ve sessiz çalışma imkanı sunduğu için bir çok uygulamada tercih edilir. Bu tez kapsamında kayısı çekirdeği yağı ile hazırlanan MR akışkanların reolojik davranışları incelenmiştir. İki farklı partikül boyutuna sahip 3 farklı konsantrasyon (%20, %30 ve %40) değerinde hazırlanan MR akışkanların farklı manyetik partikül boyutu, manyetik partikül konsantrasyonu ve manyetik alan şiddeti parametrelerinde reolojik davranışları incelenmiştir. Bu parametreler doğrultusunda sentezlenen 6 adet MR akışkanın kayma hızlarına karşı kayma gerilimi değerleri grafiğe geçirildi. Grafikler incelendiğinde sentezlenen MR akışkanların gerek manyetik alanlı gerekse manyetik alansız ortamlarda Bingham akış modeline uyduğu gözlemlenmiştir. Manyetik partikül boyutu, konsantrasyonu ve uygulanan manyetik alan şiddetindeki artışın akışkanın viskozitesi ile akımın başlaması için gerekli olan eşik kayma gerilimi değerlerini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada MR akışkanların çökme davranışları da incelenmiştir. Akışkan içerisinde yer alan manyetik partikül boyutu ve konsantrasyonu arttıkça çökme oranlarının az da olsa bir arttığı görülmüştür. Ancak belirlenen çökme oranları oldukça düşüktür (lazer yazıcı toner tozu için; %14-%16, Fe₃O₄ için; %15,5-%18,5' dir) ve çökme oranlarının düşük olması ile elde edilen bu başarı kullanılan katkı maddesi kaynaklıdır. Bu tez kapsamında sentezlenen MR akışkanların manyetik partikül konsantrasyonundaki artışın manyetik alan şiddeti ile eşik kayma gerilmesi arasındaki ilişkiye etkisi de incelenmiştir. Elde edilen verilerden manyetik partikül konsantrasyonu arttıkça manyetik alanın eşik kayma gerilimine bağlılığını gösteren üssün de arttığı gözlemlenmiştir.

Çalışmamızın sonucunda manyetik alana duyarlı, çökme oranı oldukça düşük MR akışkanlar elde edilmiştir. Sentezlenen bu akışkanların çeşitli alanlarda (damperlerde, otomobil sektöründe; fren, debriyaj sistemlerinde, motorsiklet direksiyonlarında ve bunun gibi sönmüleme ve mekanik kontrol gereken birçok uygulamada) kullanılabilirliğinin incelenmesi için daha detaylı deneysel çalışmalar gereklidir.

6. KAYNAKLAR

Akalın Ç. (2018). *Manyetoreolojik silindirli yarı etkin diz eklemi ortezi tasarımı*. Yüksek Lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Akar, F. ve Yağımlı, M. (2000). *Elektroteknik – 1*. Beta Yayıncılık, İstanbul, 295 p.

Akdoğan K. E. (2011). *Pnömatik ve manyetoreolojik silindirli elektronik diz üstü protezlerin tasarımı ve geliştirilen hareket inceleme sistemleri ile karşılaştırılması*. Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Anonymous. (2019). http://content.ims.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/66494/29590/7.hafta_vikoelastisie-reolo.pdf (on-line access on 12 Oct, 2019).

Anonymous. (2019). <http://www.Solverkimya.com/site/makaleler/madeni-yag-makaleleri/gres-yagi-nedir-gres-yagi-cesitleri-gres-yagi-formulleri.html> (on-line access on 5 Feb, 2019).

Atabay E.(2012). *Dynamics of a landing gear mechanism*. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Aydın H. A., Baltacı A., Tonay, Gürses B. O., Sabancı S., Ertekin M., Erden S. (2018). Manyetoreolojik sıvı ile el rehabilitasyon cihazı tasarımı ve üretimi. Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik, Fakültesi *Fen ve Müh. Derg.* **59** – 20.

Boileau P.E., Boutin J., Clair K.A.ST., McManus S.J., Rakheja S. (2002). Evaluation of vibration and shock attenuation performance of a suspension seat with a semi-active magnetorheological fluid damper. *J. Sound Vib.* **253**, 313-327.

Chhabra C. (2010). *Non-Newtonian Fluids: An Introduction, Rheology of Complex Fluids*, In Deshpande, A. Krishnan, Jr. And Kumar, P. (eds), Chapter 1, Springer, USA, 3-34 p.

Çetin Ş. (2018). *MR sönümleyici ile yapıların titreşim kontrolü*. Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Demir K. N. (2011). *Kayıcı çekirdeği yağının ekstraksiyonunda enzim etkisi: ekstraksiyon koşullarının optimizasyonu*. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Dede M.İ.C., Karabulut M.G., B. Taner. (2015). MR sıvısı ile çalışan haptik kol tasarımı. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, **10-12**.

Doğdu N. (2015). *Manyetoreolojik sıvılar için yeni bir model geliştirilmesi ve sönümleme özelliklerinin tayini*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Franco J.M., Gallegos C., Martin-Alfonso J.E., Sanchez M.C., Valencia C. (2009). Rheological modification of lubricating greases with recycled polymers from different plastics waste. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 4136–4144.

Franco J.M., Gallegos C., Martin-Alfonso J.E., Sanchez M.C., Valencia C. (2007). Development of new lubricating grease formulations using recycled LDPE as rheology modifier additive. *Eur. Polym. J.*, **43**, 139–149.

Gadekar P., Kanthale V.S., Khaire N.D.(2017). Magnetorheological fluid and its applications. *Int. J. Curr. Eng. Technol.*, **7**, 2277-4106, 2347-5161.

Güler S. (2010). *Manyetoreolojik akışkanların sentezi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Gümrük R., Mazlum U. (2017). Manyeto-reolojik malzemelere ferromanyetik toz ilavesinin mekanik özelliklere etkisinin deneysel olarak incelenmesi, *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, **23**, 417- 421.

Helvacı Ş.Ş., Peker S. (2013). *Akışkanlar Mekaniği*, Literatür Yayıncı, İstanbul, 80 p.

Khan S.A., Suresh A., Ramaiah N.S. (2014). Principles, characteristics and applications of magneto rheological fluid damper in flow and shear mode, *Procedia Mater. Sci.*, **6**, 1547-1556.

Kendir E. (2011). *Optik lif manyetik alan algılayıcısı tasarımı ve manyetik alan ölçümü*. Yüksek Lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi.

Kocabıykoğlu, Z.U. (2016). *Temel Elektrik – 2*. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 122 p.

MEB (2011). *Elektrik-Elektronik Teknolojisi. Elektriğin temel esasları*. 522EE0010. Ankara, 85 p.

Morishita S., Sakural T., Sugiyama S. (2013). Vibration control of a structure using magneto-rheological grease damper. *Front. Mech. Eng.*, **8**, 261-267.

Özsoy K. (2011). *Manyeto-Reolojik malzemelere ait matematiksel bir model ve manyeto-reolojik cihazlar*. Yüksek Lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Paksoy M. (2013). *Taşıt titreşimlerinin MR sönümleyici ile yarı aktif bulanık kontrolü*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız teknik Üniversitesi, İstanbul.

Sadeghimorad A. (2013). *Manyetoreolojik (MR) silindirli yarı etkin diz ekleminin sonlu durum denetimi*. Yüksek Lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Spaggiari A. (2013). Properties and applications of magnetorheological fluids. *Frattura Integr. Strutt.*, **23**, 57-61.

Taşcıoğlu Y. (2017). Kampana tipi ve disk tipi manyetoreolojik frenlerin sayısal yöntemlerle karşılaştırılması. *Fen Bil. Derg.*, **5**: 1- 10

Topçu O. (2018). *Kuvvet-Geri-Beslemeli sistemler için sağınımlı döner manyetoreolojik fren geliştirilmesi*. Doktora tezi, Tobb Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara.

Türküçü T. (2013). *Manyeto-Reolojik akışkanlı motor takozu tasarımı ve karakteristiğinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Ulasyar A. (2018). *Design adaptive control of magnetorheological damper for washing machine*. Doktora tezi, Koç Üniversitesi, Ankara.

Uysal B. Z. (2006). *Akışkanlar Mekaniği*, alp yayınevi, Ankara, 87 p.

Uzun H.E. (2008). *Manyetoreolojik akışkanların sentezi*. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yabansu Y. C. (2008) . *Semi active suspension control with magnetorheological dampers*. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yeğiner Y. (2014). *Yer çekimi etkili newtonyen olmayan düşen film akışı*. Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Yıldırım G. (2011). *Investigation of heat transfer mechanism in magnetorheological (MR) and ferrofluids under controlled magnetic filed and stationary conditions*. Yüksek Lisans tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

Yıldız A. S. (2013). *Çeyrek taşıt sisteminin MR sönümleyici ile uyarlamalı yarı aktif kontrolü*. Yüksek Lisans tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli.

Yılmaz R. (2007). *Viskoz malzemelerin akışı ve modellenmesi*. Yüksek Lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Esranur KAYA

Doğum Yeri ve Tarihi: MALATYA/1993

Adres: İnönü Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, MALATYA

E-Posta: esranurkaya.ef@gmail.com

Lisans: İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği (2012-2016)

